Modelo de coordinación logística para productores de piña de Lebrija, Santander

Laura Alejandra Beltrán Figueroa, Kelly Tatiana Carrascal Moreno

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniera Industrial

Director

Javier Eduardo Arias Osorio

Magíster en Administración

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Estudios Industriales y Empresariales

Programa de Ingeniería Industrial

Bucaramanga

2026

Tabla de contenido

Introducción 14

1. Generalidades de la investigación 16

1.1. Planteamiento del problema 16

1.2. Pregunta de investigación 17

2. Objetivos 18

2.1. Objetivo general 18

2.2. Objetivos específicos 18

3. Alcance y delimitación del estudio 20

4. Marco de referencia 22

4.1. Marco de antecedentes 22

4.1.1. Estudios nacionales 22

4.1.2. Estudios internacionales 24

4.2. Marco teórico 27

4.2.1. Fundamentos de la logística 28

4.2.2. Cadenas productivas y agroalimentarias 30

4.2.3. Esquemas de distribución, primera milla y consolidación de cargas 32

4.2.4. Herramientas de análisis y decisión: multicriterio, VSM y tecnologías de apoyo 33

4.2.5. Sostenibilidad y gobernanza 34

4.2.6. El modelo de coordinación logística 35

5. Metodología 36

5.1. Fase 1: Caracterización del sistema logístico 37

5.2. Fase 2: Diagnóstico del sistema logístico 39

5.3. Fase 3: Evaluación y selección del esquema de coordinación logística y de las tecnologías accesibles 42

5.4. Fase 4: Diseño del modelo de coordinación logística 43
5.5. Fase 5: Estimación de resultados 44
6. Caracterización del sistema logístico de los productores de piña de Lebrija, Santander 47
6.1. Caracterización territorial del municipio de Lebrija, Santander 47
6.2. Contexto productivo nacional, departamental y municipal 48
6.3. Actores de la cadena productiva 49
6.4. Procesos logísticos y flujo del proceso productivo 52
7. Diagnóstico del sistema logístico 54
7.1. Análisis de entrevistas 54
7.2. Análisis técnico 60
7.2.1. Lista de chequeo del proceso productivo 60
7.2.2. Análisis de pérdidas 62
7.3. Análisis de costos 65
7.3.1. Costos de materiales y suministros 66
7.3.2. Costos de mano de obra 67
7.3.3. Costos logísticos del productor 68
7.3.4. Costo total y costo unitario 68
7.3.5. Ingresos y margen 69
7.4. Síntesis del diagnóstico: puntos críticos del sistema logístico 70
8. Evaluación y selección de los esquemas de coordinación y de las tecnologías accesibles 72
8.1. Descripción de los esquemas de coordinación y su relación con los modelos 73
8.1.1. Esquema 1: coordinación descentralizada o individual 73

8.1.2. Esquema 2: coordinación colaborativa mediante consolidación de carga en ruta multipunto 74

8.1.3. Esquema 3: coordinación centralizada en un nodo de acopio veredal o zonal 75

8.2. Evaluación multicriterio de los esquemas de coordinación 76

8.3. Selección del esquema de coordinación 78

8.4. Evaluación e identificación de tecnologías accesibles 79

8.4.1. Nivel I: captura de información 79

8.4.2. Nivel II: registro y trazabilidad de información 80

8.4.3. Nivel III: coordinación logística 80

8.5. Matriz de evaluación multicriterio 82

8.5.1. Criterios y ponderaciones 82

8.5.2. Resultados de la evaluación 83

9. Estructura y especificación del modelo 85

9.1. Proceso de diseño del modelo 91

9.1.1. VSM actual: estado de la cadena sin el modelo 93

9.1.2. Componentes del modelo de coordinación logística propuesto 94

9.1.3. Efectos del modelo sobre los actores de la cadena 100

10. Evaluación ex ante de los resultados del modelo 102

10.1. Premisas de la estimación 103

10.2. Aporte de la consolidación de carga 105

10.3. Efecto sobre el costo de transporte 106

10.4. Efecto sobre las emisiones 107

10.5. Aporte del intercambio de información 109

10.6. Aporte de la programación conjunta de despachos 110

10.7. Efecto sobre la pérdida poscosecha total declarada 111

10.8. Seguimiento de la merma durante el transporte 112
10.9. Ahorro total conservador 113
10.10. Ahorro bajo un precio desfavorable 114
10.11. Valoración del aporte frente a los puntos críticos 115
10.12. Limitaciones y riesgos de implementación 117
10.13. Oportunidades para una futura implementación 119
10.14. Recomendaciones para la prueba piloto 120
11. Discusión 120
11.1. La descoordinación como restricción principal 121
11.2. La consolidación de cargas en la primera milla 121
11.3. Tecnologías accesibles frente a soluciones de alta sofisticación 122
11.4. La asociatividad como condición y como riesgo 122
11.5. Alcance de los resultados 123
12. Conclusiones y recomendaciones 123
12.1. Cumplimiento de objetivos 123
12.2. Conclusiones 123
12.3. Recomendaciones 125
Referencias 129

Lista de Tablas

Tabla 1. Cumplimiento de los objetivos 19

Tabla 2. Comparación de estudios nacionales e internacionales 25

Tabla 3. Ecuaciones de búsqueda estructurada y resultados obtenidos 26

Tabla 4. Ecuaciones de búsqueda dirigida 27

Tabla 5. Matriz de consistencia entre objetivos, métodos, resultados y evidencia 46

Tabla 6. Parámetros técnicos de la variedad MD2 relevantes para la cadena logística 48

Tabla 7. Área, producción y rendimiento de piña en Lebrija y Santander, 2019–2024 49

Tabla 8. Actores, roles y etapas de la cadena productiva de piña en Lebrija, Santander 50

Tabla 9. Entidades del entorno institucional de la cadena productiva de piña en Lebrija, Santander 51

Tabla 10. Caracterización de los flujos de la cadena productiva de piña en Lebrija, Santander 51

Tabla 11. Identificación del proceso logístico del sistema 52

Tabla 12. Recursos del sistema logístico 53

Tabla 13. Resumen de hallazgos por grupo consultado en las entrevistas semiestructuradas 54

Tabla 14. Porcentaje de cumplimiento del proceso productivo por eje de evaluación 61

Tabla 15. Pérdidas registradas en la guía de observación del sistema logístico 62

Tabla 16. Distribución porcentual de pérdidas por tipo 64

Tabla 17. Incidencia de los niveles de impacto en las pérdidas 64

Tabla 18. Costos de materiales y suministros para una hectárea de piña variedad MD2 66

Tabla 19. Costos de mano de obra por hectárea y ciclo productivo 67

Tabla 20. Costo de transporte según el calibre de la fruta, por hectárea y ciclo.....68

Tabla 21. Estructura de costos del productor por hectárea y ciclo productivo 69

Tabla 22. Ingresos por calibre, por hectárea y ciclo productivo 70

Tabla 23. Matriz de evaluación multicriterio de los esquemas logísticos aplicables 77

Tabla 24. Alternativas tecnológicas evaluadas para la cadena productiva de piña en Lebrija, Santander.....80

Tabla 25. Criterios y ponderaciones de la matriz de evaluación multicriterio 83

Tabla 26. Evaluación consolidada de alternativas tecnológicas 84

Tabla 27. Especificación de los elementos del modelo de coordinación logística propuesto 86

Tabla 28. Relaciones entre los elementos del modelo 87

Tabla 29. Reglas de operación del modelo 88

Tabla 30. Sistema de indicadores de desempeño del modelo 89

Tabla 31. Trazabilidad entre los puntos críticos del diagnóstico y las decisiones de diseño del modelo.....91

Tabla 32. Conformación de rutas consolidadas por zona y distancia incremental 96

Tabla 33. Volumen estimado por despacho según los datos reportados por cada productor .97

Tabla 34. Efectos del modelo sobre cada actor de la cadena.....101

Tabla 35. Indicadores de desempeño ambiental del modelo de coordinación logística propuesto 108

Tabla 36. Escenarios de reducción de emisiones según base de cálculo 109

Tabla 37. Comparativa de costos entre el escenario actual y propuesto 113

Tabla 38. Comparación de ahorros estimados según escenario de precio 115

Tabla 39. Aporte potencial del modelo frente a los puntos críticos del diagnóstico 116

Tabla 40. Riesgos de implementación del modelo y medidas de mitigación 118

Lista de Figuras

Figura 1. Resultados matriz multicriterio 84

Figura 2. Arquitectura del modelo de coordinación logística propuesto 90

Figura 3. Plantilla de consolidación de pedidos en Google Sheets 94

Figura 4. Interfaz del prototipo de plataforma web de coordinación logística 95

Lista de Ecuaciones

Ecuación 1. Fórmula para el cálculo del porcentaje de cumplimiento del proceso productivo 60

Ecuación 2**.** Fórmula para el cálculo de la distribución porcentual de pérdidas.....63

Ecuación 3. Puntuación ponderada en la matriz multicriterio 83

Ecuación 4. Ahorro en transporte por productor por despacho. 106

Ecuación 5. Emisiones de CO_2 por escenario 107

Lista de Apéndices

Los apéndices están adjuntos en el repositorio institucional

Apéndice A. Instrumentos de recolección de información.

Apéndice B. Plantilla de consolidación de pedidos.

Apéndice C. Diagrama de flujo del proceso productivo de la piña.

Apéndice D. VSM del estado actual del sistema logístico.

Resumen

Título: Modelo de coordinación logística para productores de piña de Lebrija, Santander [*].

Autoras: Kelly Tatiana Carrascal Moreno, Laura Alejandra Beltrán Figueroa[**]

Palabras clave: Modelo de coordinación logística, sistema logístico, cadena productiva, consolidación de carga, productores de piña.

Descripción: En 2024, Lebrija, Santander, produjo 232.515 toneladas de piña en 5.312 hectáreas cosechadas, con un rendimiento de 45,0 t/ha (UPRA, 2025). Sin embargo, su sistema logístico opera de forma desarticulada. Esta investigación propone un modelo de coordinación para distribuir piña desde Lebrija hasta la Central de Abastos de Bucaramanga y estima sus resultados ex ante.

Se empleó un enfoque mixto, descriptivo y propositivo, en cinco fases: caracterización y diagnóstico de la cadena, selección multicriterio del esquema de coordinación y de tecnologías accesibles, diseño del modelo y evaluación ex ante. El diagnóstico integró entrevistas a los actores, observación de campo, lista de chequeo, guía de pérdidas y una estructura de costos por hectárea.

El modelo articula tres componentes: flujo de información, flujo físico mediante rutas consolidadas con recolección multipunto y flujo de decisiones entre productor, líder veredal y asociación. Se estima un ahorro de $162.500 por despacho de 2,5 toneladas, equivalente a $2.437.500 mensuales por productor con 15 despachos, mediante un escenario de reducción de la pérdida poscosecha total declarada del 10 % al 5 %. Asimismo, la configuración factible podría disminuir los viajes semanales de 77 a 42 y evitar cerca de 3.423 kg de CO_2 por semana (14,8 toneladas mensuales).

[*] Trabajo de Grado.

[**] Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Estudios Industriales y Empresariales. Director: Javier Eduardo Arias Osorio, Magíster en Administración.

ABSTRACT

Title: A Logistics Coordination Model for Pineapple Growers in Lebrija, Santander[*].

Authors: Kelly Tatiana Carrascal Moreno, Laura Alejandra Beltrán Figueroa[**].

Keywords: logistics coordination model, logistics system, productive chain, freight consolidation, pineapple growers.

Description: In 2024, Lebrija, Santander, produced 232,515 metric tons of pineapple from 5,312 harvested hectares, with a yield of 45.0 t/ha (UPRA, 2025). However, its logistics system operates in a fragmented manner. This study proposes a coordination model for pineapple distribution from Lebrija to the Bucaramanga Central Market and estimates its results ex ante.

A mixed-methods approach with a descriptive and proposal-oriented scope was used in five phases: characterization and diagnosis of the chain, multi-criteria selection of the coordination scheme and accessible technologies, model design, and ex ante evaluation. The diagnosis integrated stakeholder interviews, field observation, a checklist, a loss observation guide, and a cost structure per hectare.

The model integrates three components: an information flow, a physical flow using consolidated routes with multipoint pickup, and a decision-making flow among the producer, village leader, and association. Estimated savings amount to COP 162,500 per 2.5-metric-ton shipment and COP 2,437,500 per producer per month, based on 15 shipments, under a scenario that reduces the total postharvest loss reported by producers from 10% to 5%. Furthermore, the feasible configuration could reduce weekly trips from 77 to 42 and avoid approximately 3,423 kg of CO_2 per week (14.8 metric tons per month).

[*] Bachelor Thesis.

[**] Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Industrial and Business Studies. Advisor: Javier Eduardo Arias Osorio, Master in Administration.

Introducción

El municipio de Lebrija, Santander, es el mayor productor de piña del departamento, con 5.312 hectáreas sembradas y una producción de 232.515 toneladas anuales (UPRA, 2025). Sin embargo, su desempeño logístico no ha sido documentado. Se desconoce la estructura de costos del productor, la forma en que se organizan los flujos logísticos hacia uno de sus destinos principales que es la Central de Abastos de Bucaramanga, y la magnitud de las pérdidas asociadas a esta operación.

En las cadenas de productos frescos, las pérdidas poscosecha pueden presentarse durante la cosecha, el almacenamiento, la manipulación, el empaque, el transporte y la comercialización. Durante el transporte, las vibraciones y las condiciones operativas pueden ocasionar daños mecánicos y pérdidas de calidad (Al-Dairi et al., 2022). Específicamente, en las cadenas de productos frescos, las barreras de eficiencia son interdependientes y pueden clasificarse en barreras de causa y de efecto, por lo que las barreras de efecto deben abordarse mediante la intervención de las causas que las originan (John & Singh, 2025).

Asimismo, en la literatura se encuentran soluciones para mejorar la coordinación logística en cadenas agroalimentarias, donde sobresalen los esquemas de consolidación de cargas y la optimización del transporte, formulados como problemas de ruteo con restricciones de capacidad y ventanas de tiempo (Han et al., 2026). De otra parte, investigaciones recientes han incorporado herramientas como el aprendizaje automático, la simulación basada en agentes y los gemelos digitales para fortalecer la toma de decisiones en la cadena de suministro (Shadkam e Irannezhad, 2025). Sin embargo, estas propuestas suelen desarrollarse bajo condiciones de disponibilidad de información, capacidades tecnológicas y niveles de coordinación que no caracterizan a muchos sistemas productivos agrícolas. A ello se suma que la adopción de esquemas colaborativos enfrenta barreras organizacionales y sociales, entre ellas, la desconfianza entre los participantes y la limitada familiaridad con este tipo de

iniciativas (Matusiewicz, 2024). En consecuencia, persiste una brecha entre las soluciones propuestas por la literatura y las condiciones reales de productores dispersos, con baja tecnificación y sin mecanismos formales de asociatividad, contexto en el que se ubica la cadena productiva analizada en este estudio.

Esta investigación propone un modelo de coordinación logística para los productores de piña de Lebrija, Santander y su distribución hacia la Central de Abastos de Bucaramanga. Para ello, se caracteriza el sistema logístico actual y se identifican y cuantifican sus principales puntos críticos; se evalúan, mediante análisis multicriterio, los esquemas de coordinación y las tecnologías accesibles; y se estructura el modelo mediante la definición de sus componentes, reglas de operación e indicadores. El modelo se organiza en tres componentes: un flujo de información apoyado en herramientas digitales gratuitas o de bajo costo, un flujo físico basado en la recolección multipunto y un flujo de decisiones distribuido en tres niveles de coordinación. La sostenibilidad opera como criterio de diseño mediante indicadores de las dimensiones económica, ambiental y social; la evaluación ex ante comprende las dos primeras dimensiones.

La investigación se desarrolla bajo un enfoque mixto, con alcance descriptivo y propositivo. La información recopilada proviene de entrevistas semiestructuradas a productores, transportistas y comerciantes mayoristas, complementadas con una entrevista a un ingeniero agrónomo, observación directa en campo y fuentes secundarias oficiales. Como resultado, se formula un modelo de coordinación logística cuyos efectos económicos y ambientales se estiman ex ante.

1. Generalidades de la investigación

1.1. Planteamiento del problema

La actividad productora de piña en el municipio de Lebrija, Santander, cuenta con 5.312 hectáreas sembradas, de las cuales se cosechan 5.167, y genera 232.515 toneladas anuales de piña. Estas cifras consolidan al municipio como el mayor productor del departamento, con un rendimiento de 45,0 t/ha sobre el área cosechada, superior en 2,9 t/ha al promedio departamental de 2024 (UPRA, 2025). A pesar de este potencial productivo, persisten interrogantes sobre las condiciones bajo las cuales se desarrolla la distribución de la piña desde los productores hacia los mercados de destino, particularmente en aspectos relacionados con la coordinación entre actores, el transporte, las pérdidas poscosecha y los costos logísticos.

La literatura sobre las cadenas productivas agrícolas en Colombia ha documentado que el eslabón del productor concentra buena parte de las ineficiencias logísticas del sistema. En contextos de producción agrícola en pequeña escala, Aristizábal Rodríguez (2013) documenta altos costos de distribución y de transacción, asociados al escaso poder de negociación del productor frente a los intermediarios, a las reducidas escalas de producción y a una infraestructura física deficiente. A ello se suma que la desconfianza entre productores entorpece la consolidación de procesos asociativos, lo que permite a los intermediarios alcanzar altos márgenes de comercialización y obliga a los cultivadores a transar sus productos en condiciones desventajosas.

En el caso específico de la piña, Flórez Martínez et al. (2020) identifican brechas tecnológicas y productivas en la cadena de piña en Colombia, relacionadas con el nivel de desarrollo y adopción de tecnologías, que constituyen aspectos relevantes para el fortalecimiento de la cadena. Entre los elementos transversales de la cadena, los autores reportan además la reducida capacidad financiera de los productores, una débil infraestructura

de poscosecha con sobrecostos y operaciones que no añaden valor, y una oferta de asistencia técnica insuficiente y de elevado costo. En conjunto, estas condiciones configuran un escenario en el que el productor asume una proporción importante de los costos logísticos de la cadena y, al mismo tiempo, ocupa la posición más débil en la formación del precio.

En Lebrija, Santander, la revisión de fuentes secundarias no permite establecer si estas condiciones, documentadas en otros contextos agrícolas, se presentan de la misma manera ni cuál es su incidencia en la distribución de la piña hacia la Central de Abastos de Bucaramanga. Esta cuestión resulta relevante por la magnitud de la producción municipal y por la importancia económica de la actividad, asociada a 3.552 empleos directos en el municipio (Alcaldía de Lebrija, 2023).

No obstante, no se dispone de información sistematizada sobre la organización de los flujos físicos y de información entre productores, transportistas y comerciantes mayoristas, ni sobre los costos logísticos y las pérdidas poscosecha asociados al tramo comprendido entre las fincas y la Central de Abastos de Bucaramanga. Este vacío limita la comprensión de las condiciones de distribución y de los requerimientos de coordinación entre los actores involucrados, lo que conduce a la siguiente pregunta de investigación.

1.2. Pregunta de investigación

¿Qué características debe tener un modelo de coordinación logística para los productores de piña de Lebrija, Santander, en la distribución hacia la Central de Abastos de Bucaramanga, considerando las condiciones actuales?

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

Proponer un modelo de coordinación logística para los productores de piña de Lebrija, Santander, articulándolos con los actores y procesos directamente vinculados a la distribución hacia la Central de Abastos de Bucaramanga.

2.2. Objetivos específicos

OE1. Caracterizar el sistema logístico de los productores de piña de Lebrija, Santander, en su despacho hacia la Central de Abastos de Bucaramanga, mediante la descripción de sus actores, procesos, flujos y recursos, con el fin de establecer la línea base del sistema actual.

OE2. Diagnosticar las condiciones logísticas, operativas y económicas del sistema logístico actual, cuantificando el cumplimiento del proceso productivo, las pérdidas poscosecha por etapa y los costos del eslabón productor, para determinar los puntos críticos que debe atender el modelo de coordinación.

OE3. Evaluar y seleccionar el esquema de coordinación logística y las tecnologías accesibles con mayor viabilidad de implementación para los productores, a partir de la revisión de literatura y de los puntos críticos identificados en el diagnóstico, mediante análisis multicriterio.

OE4. Estructurar un modelo de coordinación logística basado en la consolidación de carga, el intercambio de información y la programación conjunta de despachos para los productores de piña de Lebrija, Santander.

OE5. Evaluar ex ante el aporte potencial del modelo de coordinación logística en la coordinación de los despachos, el aprovechamiento del transporte y el intercambio de información en el sistema logístico de los productores de piña de Lebrija, Santander.

Cada objetivo específico corresponde a una fase del estudio. La Tabla 1 sintetiza su cumplimiento. Los resultados del OE1 y el OE2 provienen del trabajo de campo, y el del OE5, de una evaluación ex ante, puesto que el modelo no se implementó durante la investigación.

Tabla 1.
Cumplimiento de los objetivos

Objetivo	Resultado obtenido	Evidencia	Alcance y limitación
OE1	Línea base del sistema logístico: red de actores, procesos, flujos y recursos del tramo entre Lebrija, Santander, y la Central de Abastos de Bucaramanga	Capítulo 6	Basada en 58 entrevistas a 56 participantes (21 productores, 15 transportistas, 21 comercializadores y un ingeniero agrónomo; dos participantes se entrevistan en dos roles); intermediarios, entidades de apoyo y clientes finales se describen con fuentes secundarias; no constituye un censo de la cadena
OE2	Dictamen diagnóstico con cumplimiento del proceso productivo del 52,9 %, diez eventos de pérdida clasificados por tipo e impacto, pérdida poscosecha total declarada por los productores (mediana del 10 %), merma en transporte como indicador de contraste (2,1 %) y descuento económico en destino (5,6 %), cifras que no se agregan por su posible solapamiento, estructura de costos del productor por hectárea y cinco puntos críticos que orientan el diseño del modelo	Capítulo 7	Basado en datos autorreportados y en cinco jornadas de observación en dos fincas, sin observación en la Central de Abastos; los costos corresponden al eslabón productor
OE3	Selección del esquema colaborativo en ruta multipunto mediante una matriz multicriterio ponderada (3,70 frente a 2,80 del nodo de acopio) y jerarquización de nueve alternativas tecnológicas mediante una matriz multicriterio ponderada, con selección de las cuatro de prioridad alta	Capítulo 8	Las valoraciones y ponderaciones son definidas por las autoras a partir del diagnóstico; el orden de los esquemas se mantiene con pesos iguales; el resultado aplica al contexto evaluado
OE4	Modelo de coordinación logística en tres componentes (flujos de información, físico y de decisiones), construido a partir del VSM del estado actual, con elementos, relaciones, seis reglas	Capítulo 9	Propuesta de diseño no validada con los actores; su evaluación ex ante se aborda en el objetivo siguiente

	de operación, indicadores de desempeño y trazabilidad entre los puntos críticos del diagnóstico y las decisiones de diseño		
OE5	Evaluación ex ante en tres dimensiones: coordinación de despachos (de 77 a 42 viajes semanales y 14,8 t de CO_2 evitadas al mes entre los 21 productores), aprovechamiento del transporte (sin ahorro monetario en el escenario base) e intercambio de información (valoración cualitativa); ahorro estimado de $162.500 por despacho de 2,5 t, atribuible exclusivamente al escenario de reducción de la pérdida poscosecha total declarada del 10 % al 5 %	Capítulo 10	Estimación realizada bajo las nueve premisas declaradas; la reducción de la pérdida poscosecha total es un supuesto apoyado en la literatura (Premisa 3), mientras la merma en transporte se conserva como subindicador operativo no aditivo (Premisa 4); las emisiones evitadas corresponden a una configuración ex ante de 36 rutas compartidas y seis viajes individuales que respeta el límite de 5.000 kg y supone desvíos no mayores a los estimados; no hay implementación ni medición posterior

3. Alcance y delimitación del estudio

La presente investigación tiene un alcance descriptivo y propositivo. Caracteriza y diagnostica el sistema logístico de los productores de piña de Lebrija, Santander, en la distribución hacia la Central de Abastos de Bucaramanga y, a partir de este diagnóstico, propone un modelo de coordinación logística cuyos resultados se estiman ex ante.

El modelo se dirige a los productores de piña de Lebrija, Santander, sin distinguirlos por tamaño de predio ni por escala de producción, de modo que la población de estudio corresponde al conjunto de productores del municipio. Las cifras de área sembrada, área cosechada, rendimiento y producción que se reportan como referencia principal corresponden al total municipal de 2024 y provienen de fuentes oficiales (UPRA, 2025); no se dispone de su desagregación por tamaño de productor. Los datos primarios de costos, pérdidas y prácticas logísticas provienen de los 21 productores entrevistados y se reportan como tales, sin proyectarse al total municipal.

El estudio adopta un enfoque de actor focal, en el cual los productores constituyen la unidad de análisis y los principales beneficiarios del modelo. Los transportistas y comercializadores mayoristas se consideran actores de frontera, cuya participación permite caracterizar las interacciones del sistema y contrastar la información obtenida. En el caso de los transportistas, sus costos se indagan únicamente para establecer un referente para el análisis del flete; los costos de los comercializadores mayoristas no se cuantifican.

Los intermediarios, entendidos como acopiadores que recogen la producción de varias fincas y consolidan cargas para su comercialización, constituyen un eslabón presente en algunos canales de la cadena productiva de la piña. Sin embargo, no se incorporan como actores operativos del modelo propuesto, dado que el esquema plantea una coordinación directa entre productores, transportistas y comerciantes mayoristas de la Central de Abastos de Bucaramanga. Las funciones de recopilación de información, consolidación de la oferta y organización de los despachos que puede realizar un intermediario serían asumidas por el líder veredal, con el apoyo de los productores y de las herramientas digitales propuestas. Esta decisión no implica que los intermediarios desaparezcan de la cadena, sino que su participación se encuentra fuera del alcance operativo del modelo. Además, debido a que no fueron entrevistados, el estudio no cuantifica sus costos, márgenes de comercialización ni el posible efecto de su exclusión sobre el precio recibido por el productor.

Geográficamente, el estudio se delimita al municipio de Lebrija, Santander, como zona productora, y al trayecto de distribución hacia la Central de Abastos de Bucaramanga. El modelo comprende las actividades desde la clasificación y preparación del producto para el despacho hasta su recepción por los comerciantes mayoristas. Incluye el registro de disponibilidad, la consolidación de carga, el cargue, el transporte, el descargue y el control de calidad. No se incluyen el aprovisionamiento de insumos ni las actividades agrícolas, salvo las variables que condicionan la calidad y la disponibilidad del producto para el despacho.

Las tecnologías consideradas corresponden a alternativas accesibles y de bajo costo, acordes con las condiciones identificadas en el territorio. La sostenibilidad se incorpora mediante la estimación de las emisiones de CO_2, mientras que la dimensión social queda planteada para una eventual fase de implementación futura.

Como resultado, la investigación caracteriza las condiciones actuales del sistema, identifica sus principales problemáticas y establece criterios para orientar la coordinación entre productores, transportistas y comercializadores mayoristas. Con base en estos hallazgos, se estructura una propuesta de coordinación logística.

4. Marco de referencia

4.1. Marco de antecedentes

El análisis de antecedentes permite identificar investigaciones previas relacionadas con la gestión de cadenas de suministro agroalimentarias, la logística de productos perecederos y, particularmente, la cadena productiva de la piña. La revisión de estudios nacionales e internacionales permite reconocer las principales problemáticas abordadas, las metodologías empleadas y las estrategias propuestas para mejorar la coordinación, el desempeño logístico y la sostenibilidad de estas cadenas. A partir de esta revisión se establecen elementos de referencia para el desarrollo de una propuesta de coordinación logística aplicable a los productores de piña de Lebrija, Santander, en su proceso de distribución hacia la Central de Abastos de Bucaramanga.

4.1.1. Estudios nacionales

En el contexto nacional, se destaca el estudio de Díaz Lizarazo et al. (2020), *Análisis de la estructura económica y ambiental de los residuos del cultivo de la piña en una zona de Lebrija, Santander*, debido a su correspondencia directa con el territorio objeto de estudio en

esta investigación. Los autores analizan las relaciones entre variables económicas y ambientales asociadas a los residuos generados por el cultivo de piña, utilizando un enfoque de dinámica de sistemas. Sus resultados permiten reconocer la importancia de considerar conjuntamente los aspectos económicos y ambientales asociados a esta actividad productiva. Este antecedente constituye un punto de partida para la presente investigación, ya que permite contextualizar la actividad piñera de Lebrija, Santander y sustentar la incorporación de estas dimensiones en el análisis del sistema logístico.

El territorio explica solo una parte del problema. La otra depende de cómo se coordinan entre sí los actores de la cadena. Cárdenas Díaz y Royeth Angulo (2020), en el estudio Modelo de planeación colaborativa en la cadena de suministro de la piña del municipio de San Marcos, Sucre, caracterizan la cadena de suministro de piña y proponen un modelo de planeación colaborativa orientado a mejorar la coordinación entre sus participantes. Sus resultados muestran que compartir información entre productores y compradores mejora el desempeño de la cadena, y sirven de referencia directa para el modelo de coordinación logística que se propone en este trabajo.

La coordinación, además, no ocurre en el vacío: depende de los recursos y las herramientas con que cuentan los actores para decidir y operar. Díaz Ramírez et al. (2022), en Brechas tecnológicas de la cadena productiva de la piña en el Valle del Cauca y descripción del estado del arte, identifica las principales brechas tecnológicas presentes en diferentes etapas de la cadena productiva de la piña. El estudio permite reconocer que las condiciones tecnológicas pueden limitar el desempeño de los actores y que la selección de soluciones debe responder a las necesidades específicas de la cadena. De ahí se toman criterios para decidir qué tecnologías son accesibles y viables dentro del modelo que aquí se propone.

4.1.2. Estudios internacionales

Los antecedentes internacionales muestran que la cadena de piña debe analizarse tanto por sus actores y capacidades como por las problemáticas que afectan su desempeño. Tröger et al. (2020), en *Re-framing post-harvest losses through a situated analysis of the pineapple value chain in Uganda*, estudian las pérdidas poscosecha en la cadena de valor de la piña y señalan que estas se relacionan con factores técnicos, con las condiciones de comercialización y con las relaciones entre los actores. Este estudio sirve de base para identificar y analizar las pérdidas por etapa dentro del sistema logístico de Lebrija, Santander.

El desempeño de la cadena también depende de sus efectos económicos, sociales y ambientales. Desclee, Sohinto y Padonou (2021), en *Sustainability Assessment and Agricultural Supply Chains: The Case of the Pineapple Supply Chain in Benin*, analizan la sostenibilidad de la cadena de suministro de piña mediante un enfoque multidimensional. Su trabajo justifica que la evaluación de alternativas logísticas incluya criterios económicos, ambientales y sociales, tal como se hace en el modelo propuesto.

Poner en marcha alternativas de mejora obliga además a prever los riesgos que afectan el funcionamiento de la cadena. Phuangsubsin, Jantakard y Vinitpittayakul (2024), en *Risk Assessment of Sustainable Pineapple Supply Chain Management*, evalúan los principales riesgos de la cadena de suministro de piña y plantean estrategias para su mitigación. De este trabajo se retoma la gestión del riesgo para valorar la viabilidad de las alternativas y anticipar las dificultades de implementación del modelo de coordinación logística.

La comparación de los estudios consultados evidencia que los trabajos disponibles abordan la sostenibilidad y la tecnología de forma independiente, sin integrar ambos componentes en un modelo operativo aplicable a productores agrícolas (Tabla 2)

Tabla 2.
Comparación de estudios nacionales e internacionales

Autor(es) y año	Contexto	Tema principal	Enfoque / metodología	Principal aporte
Díaz Lizarazo et al. (2020)	Lebrija, Santander, Colombia	Aspectos económicos y ambientales de la actividad piñera	Dinámica de sistemas	Analiza las relaciones entre variables económicas y ambientales asociadas a los residuos del cultivo de piña
Cárdenas Díaz & Royeth Angulo (2020)	San Marcos, Sucre, Colombia	Planeación colaborativa en la cadena de suministro de piña	Caracterización y modelamiento de la cadena	Propone una alternativa de planeación colaborativa para mejorar la articulación entre actores
Díaz Ramírez et al. (2022)	Valle del Cauca, Colombia	Brechas tecnológicas de la cadena productiva de piña	Revisión documental y análisis con actores	Identifica necesidades y brechas tecnológicas en la cadena productiva
Tröger et al. (2020)	Uganda	Pérdidas poscosecha en la cadena de piña	Análisis de la cadena de valor y de los actores	Evidencia que las pérdidas están relacionadas con factores técnicos, comerciales y con las relaciones entre actores
Desclee et al. (2021)	Benín	Sostenibilidad de la cadena de suministro de piña	Evaluación multidimensional de la cadena	Analiza las dimensiones económica, social y ambiental y los principales puntos críticos de la cadena
Phuangsubsin et al. (2024)	Tailandia	Riesgos en la cadena de suministro de piña	Evaluación de riesgos y estrategias de mitigación	Identifica riesgos y propone estrategias para mejorar la flexibilidad y sostenibilidad de la cadena

La revisión de literatura se desarrolla en dos momentos: una búsqueda estructurada en bases de datos científicas durante la formulación del proyecto en 2025, y una búsqueda dirigida en 2026, orientada a los vacíos temáticos identificados una vez definido el alcance del modelo. Las ecuaciones del primer momento se verifican nuevamente en 2026 para contrastar los resultados con el estado actualizado de las bases. No corresponde a una revisión sistemática en

sentido estricto, dado que no se aplica un protocolo de cribado por pares ni una evaluación formal de la calidad de los estudios; su alcance es el de una revisión narrativa estructurada.

Búsqueda estructurada. La base de datos Scopus se selecciona por su cobertura multidisciplinaria y su actualización constante. La búsqueda se realiza sobre el campo TITLE-ABS-KEY, con publicaciones entre 2020 y 2025, sin restricción de idioma, y tipos documentales de artículo de investigación, revisión de literatura y acta de congreso. La búsqueda inicial se ejecuta durante la formulación del proyecto en 2025. Los resultados que se reportan en la Tabla 3 corresponden a la verificación de esas mismas ecuaciones, realizada el 9 de agosto de 2026, cuyas cifras resultan ligeramente superiores por el crecimiento de la base en el intervalo.

La búsqueda se estructura en tres niveles progresivos de refinamiento: el primero identifica el panorama general de la literatura sobre cadenas agrícolas y transporte; el segundo incorpora el componente tecnológico; y el tercero acota a los estudios que integran sostenibilidad, optimización y tecnología en el marco de la logística agrícola.

Tabla 3.
Ecuaciones de búsqueda estructurada y resultados obtenidos

N.º	Ecuación	Resultados
1	("pineapple" OR "agricultural supply chain" OR "tropical fruit") AND ("logistics" OR "supply chain model" OR "transportation")	275
2	("pineapple" OR "agricultural supply chain") AND ("logistics" OR "supply chain model") AND ("technology")	61
3	("pineapple" OR "agricultural supply chain") AND ("sustainability" OR "optimization") AND ("technology" OR "digitalization" OR "precision agriculture" OR "agriculture 4.0") AND ("logistics" OR "supply chain model")	28

Nota. Scopus, campo TITLE-ABS-KEY, período 2020-2025. Consulta verificada el 9 de agosto de 2026.

Sobre los 28 documentos del tercer nivel se aplican criterios de inclusión referidos a la pertinencia temática, el enfoque metodológico y la aplicabilidad al contexto de productores de piña de Lebrija, Santander, resultando ocho exclusiones y 20 documentos incorporados.

Búsqueda dirigida. Los documentos obtenidos no cubren tres componentes centrales del modelo: la consolidación de cargas en la primera milla, la asociatividad de productores agrícolas en el contexto colombiano y las barreras de adopción de esquemas de logística compartida. Se ejecutan por tanto cuatro ecuaciones adicionales en ScienceDirect, SciELO, Redalyc y Dialnet; sus resultados se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4.
Ecuaciones de búsqueda dirigida

Vacío temático	Ecuación	Base	Resultados	Seleccionados
Consolidación en primera milla	"first mile" AND agricultural AND logistics	ScienceDirect	7	5
Recolección multipunto	"milk run" AND agricultural AND logistics	ScienceDirect	4	1
Asociatividad rural en Colombia	asociatividad AND pequeños productores AND Colombia	SciELO · Redalyc · Dialnet	25	2
Barreras de logística compartida	"shared logistics" AND barriers AND adoption	ScienceDirect	10	2

Nota. Consulta realizada en 2026. Los documentos seleccionados se integran en el marco de referencia y en la discusión.

Como resultado de la búsqueda, se seleccionó y sintetizó literatura científica y técnica sobre logística agroalimentaria, consolidación de cargas, coordinación, tecnologías accesibles y sostenibilidad. Los hallazgos obtenidos sustentan el marco de referencia presentado en este capítulo y la contrastación de los resultados desarrollada en el Capítulo 11.

4.2. Marco teórico

Los conceptos que sustentan la investigación se organizan en tres bloques. El primero establece los fundamentos logísticos: la función logística, el sistema logístico como unidad de análisis, los tipos de cadena en que este se inserta y los esquemas con que se organiza la

distribución física. El segundo presenta las herramientas de análisis y decisión empleadas para diagnosticar sistemas logísticos y comparar alternativas. El tercero reúne los criterios de sostenibilidad y gobernanza que condicionan la permanencia de los mecanismos de coordinación, y converge en la noción de modelo de coordinación logística.

4.2.1. Fundamentos de la logística

El primer bloque conceptual reúne los fundamentos logísticos que se desarrollan en los apartados 4.2.1 a 4.2.3: la función logística, el sistema logístico, la cadena en que este se inserta y los esquemas de distribución. Los términos logística, sistema y coordinación logísticos suelen emplearse de manera intercambiable, pese a que designan planos distintos del análisis. El primero corresponde a una función de gestión; el segundo, al conjunto concreto de recursos y procesos en que esa función se ejecuta; el tercero, a la dificultad que aparece cuando ese conjunto no depende de una sola organización.

La gestión logística se entiende como la parte de la gestión de la cadena de suministro que planifica, implementa y controla el flujo y el almacenamiento directo e inverso, eficiente y eficaz, de bienes, servicios e información relacionada entre el punto de origen y el punto de consumo, con el fin de satisfacer los requerimientos del cliente (CSCMP, 2013). La definición distingue dos sentidos del flujo: el directo, que va del origen al consumo, y el inverso, asociado a devoluciones y recuperación de materiales. La cadena de suministro es, en este marco, la red de organizaciones y flujos que hace posible la entrega.

El sistema logístico corresponde a la unidad concreta en la que esa función se ejecuta y está conformado por tres categorías principales de elementos: los actores que intervienen en él, los recursos utilizados por dichos actores y los métodos y herramientas empleados para alcanzar los objetivos del sistema. Los recursos comprenden elementos humanos, materiales e informacionales, mientras que los métodos y herramientas permiten desarrollar las actividades

necesarias para su funcionamiento. Su finalidad es prestar los servicios requeridos bajo condiciones de costo, calidad y cumplimiento de los plazos establecidos (Zgaya y Hammadi, 2016).

De acuerdo con el Council of Supply Chain Management Professionals (CSCMP, 2013), la gestión de la cadena de suministro comprende la planificación y coordinación de actividades entre las organizaciones que participan desde el origen hasta el consumo. La gestión logística forma parte de ese ámbito y se concentra en planificar, implementar y controlar los flujos y el almacenamiento de bienes, servicios e información. En este estudio, esta distinción permite analizar el sistema logístico como el conjunto de procesos, recursos e infraestructura mediante los cuales los productores ejecutan las actividades de despacho dentro de la cadena de suministro.

Cuando el sistema logístico no está bajo el control de una sola organización, sino que lo integran actores que deciden de manera autónoma, su desempeño depende tanto de los recursos disponibles como de la forma en que se articulan esas decisiones. La coordinación logística aborda ese problema y comprende la articulación de decisiones y actividades entre actores interdependientes de una cadena de suministro. En las cadenas agroalimentarias, esta coordinación resulta relevante debido a la necesidad de sincronizar actividades como la cosecha, el despacho, el transporte y la entrega, particularmente cuando existen productos perecederos y productores dispersos (Handayati et al., 2015).

La coordinación puede apoyarse en mecanismos como el intercambio de información, la programación conjunta, la definición de responsabilidades y la organización compartida del transporte. La efectividad de estos mecanismos depende del grado de interdependencia entre los actores y de la existencia de reglas explícitas que regulen su aplicación (Handayati et al., 2015).

4.2.2. Cadenas productivas y agroalimentarias

El sistema logístico de un productor no opera aislado, sino inserto en un entramado sectorial más amplio que condiciona sus márgenes, sus tiempos y sus interlocutores. Ese entramado se ha denominado de distintas formas según la tradición disciplinar y el marco normativo desde el que se le observe.

En el contexto colombiano, la Ley 811 de 2003 establece el marco jurídico para las organizaciones de cadena del sector agropecuario y define la cadena como el conjunto de actividades que se articulan técnica y económicamente desde el inicio de la producción y elaboración de un producto agropecuario hasta su comercialización final. La norma reconoce la participación de los agentes vinculados con la producción, transformación, comercialización, distribución y provisión de servicios e insumos, así como la participación gubernamental en las organizaciones de cadena.

Desde una perspectiva de análisis sistémico, la cadena productiva se plantea como una herramienta para estudiar las relaciones entre los diferentes agentes mediante los flujos de materiales, capital e información (Castro y Lima, 2006, como se citó en Flórez Martínez et al., 2020), enfoque retomado por estos últimos autores en el análisis de la cadena productiva de la piña en Colombia. Bajo este enfoque, los eslabones, segmentos, flujos de interrelación y entornos transversales constituyen los elementos para analizar la estructura y el funcionamiento de una cadena productiva.

La literatura emplea estos términos con alcances diversos, por lo que resulta necesario precisar su uso en esta investigación. La cadena productiva se entiende como la articulación técnica y económica de las actividades y los agentes que intervienen desde la producción de un bien agropecuario hasta su comercialización final (Congreso de la República de Colombia, 2003; Flórez Martínez et al., 2020). La gestión de la cadena de suministro comprende la

planificación y coordinación de las actividades y los flujos entre las organizaciones que participan desde el origen hasta el consumo (CSCMP, 2013). Cuando el producto es un alimento, la cadena de suministro agroalimentaria incorpora actividades como el cultivo, la cosecha, el procesamiento, el almacenamiento y la distribución, condicionadas por factores como la perecibilidad, la estacionalidad y la variabilidad de la oferta y la demanda (Taşkıner y Bilgen, 2021). El sistema logístico, por su parte, corresponde a la unidad concreta de análisis integrada por actores, recursos, métodos y herramientas para ejecutar dichos flujos (Zgaya y Hammadi, 2016).

Cuando el producto que recorre la cadena es un alimento, aparecen condicionantes que no están presentes en otros sectores. Taşkıner y Bilgen (2021) señalan que las cadenas de suministro agroalimentarias comprenden diversas actividades orientadas a llevar los productos agrícolas desde las fincas hasta los consumidores, entre ellas el cultivo, la cosecha, el procesamiento, la distribución y el almacenamiento, en las que participan actores como agricultores, cooperativas, transportadores, comerciantes, minoristas y consumidores, entre otros. Los autores destacan, asimismo, características propias de estas cadenas, como la perecibilidad, la vida útil limitada, la estacionalidad de la producción, la variabilidad de los rendimientos y de la demanda, y los requerimientos específicos de almacenamiento y transporte.

En este contexto, la cadena de suministro agroalimentaria se analiza como un sistema de actores interdependientes, cuyo desempeño depende tanto de los flujos físicos y de información que la recorren como de las relaciones de poder entre sus eslabones; en particular, del poder de negociación de los productores frente a los intermediarios, que condiciona el reparto del margen de comercialización a lo largo de la cadena (Aristizábal Rodríguez, 2013).

4.2.3. Esquemas de distribución, primera milla y consolidación de cargas

Definidos el sistema logístico y la cadena en que se inserta, queda por precisar cómo se organiza físicamente el traslado del producto. Esa organización admite configuraciones distintas, y la elección entre ellas determina buena parte del costo de transporte que asume el productor.

Un esquema de distribución es la configuración mediante la cual los productos se movilizan desde los puntos de origen hasta los de destino, considerando la organización de las actividades de transporte, los puntos de consolidación o transferencia y los medios utilizados para realizar la entrega (Parfenov et al., 2021). Los esquemas de distribución se diferencian entre sí por el grado de consolidación de la carga y por la existencia o no de nodos intermedios de transferencia.

En cadenas agrícolas con productores dispersos y volúmenes individuales reducidos, la literatura distingue tres esquemas. El primero es el despacho autónomo, en el que cada productor contrata el transporte de forma individual. El segundo es el enrutamiento consolidado con recolección multipunto, conocido como ruta lechera, que agrupa orígenes geográficamente próximos en un mismo viaje (Han et al., 2026). El tercero incorpora un punto físico de acopio, lo que añade las decisiones de localización y capacidad del nodo (Gao et al., 2025). La elección entre estos esquemas depende de la infraestructura vial disponible, del grado de asociatividad entre los productores y de la inversión inicial requerida. Sobre este último factor, Liu y Osman (2023) identifican el costo percibido como uno de los factores críticos asociados con la adopción de tecnología blockchain en las cadenas de suministro agrícolas.

La primera milla corresponde al tramo inicial de la distribución de productos agrícolas, desde los campos o unidades productivas hasta un punto de recepción o consolidación. En las cadenas agroalimentarias, este tramo puede organizarse mediante entregas independientes

desde cada predio hacia el punto de destino, lo que puede generar mayores costos de transporte y un uso menos eficiente de los vehículos. Gámez-Albán et al. (2024) señalan que la organización de la primera milla es especialmente relevante para productos perecederos, debido a la necesidad de trasladarlos oportunamente desde los campos hasta los centros de recepción y consolidación. En contextos de producción en pequeña escala, Majluf-Manzur et al. (2021) identifican dificultades para acceder a servicios de logística de primera milla a precios razonables, asociadas con menores márgenes y mayores pérdidas de alimentos. Como alternativa, los autores plantean la coordinación y consolidación de las cosechas de diferentes productores para su traslado hacia una instalación de empaque o recepción.

La consolidación de cargas consiste en agrupar volúmenes provenientes de diferentes puntos de origen para realizar su traslado mediante un mismo servicio de transporte. Gámez-Albán et al. (2024) analizan esta alternativa mediante un modelo de rondas de recogida aplicado a una cooperativa agrícola con 166 predios productores de duraznos y nectarinas, y encuentran que, frente a la situación de entregas individuales, las rondas de recogida reducen los costos logísticos, el costo por tonelada y el kilometraje por tonelada. Estos resultados corresponden a las condiciones particulares del caso analizado y muestran el potencial de las rondas de recogida como mecanismo de consolidación en la primera milla.

4.2.4. Herramientas de análisis y decisión: multicriterio, VSM y tecnologías de apoyo

El análisis de un sistema logístico y la formulación de alternativas para mejorarlo se apoyan en instrumentos de distinta naturaleza: unos sirven para representar y diagnosticar cómo opera el proceso, otros para decidir entre opciones que compiten entre sí, y otros actúan como soporte de la operación misma.

El análisis de decisión multicriterio (MCDA, por sus siglas en inglés) comprende un conjunto de métodos orientados a apoyar problemas de decisión en los que intervienen

múltiples criterios. Estos métodos permiten estructurar el problema, evaluar las alternativas disponibles e incorporar las preferencias del decisor para apoyar la selección de una alternativa (Cinelli et al., 2020).

El mapeo del flujo de valor, conocido por su sigla en inglés VSM, representa los flujos de materiales e información de un proceso e identifica las actividades que agregan valor y aquellas que generan esperas o desperdicios. Su aplicación en cadenas agroalimentarias permite identificar procesos y puntos críticos asociados con pérdidas y desperdicios a lo largo de la cadena de suministro (De Steur et al., 2016).

Las tecnologías de apoyo logístico son herramientas digitales que facilitan la captura, el intercambio, el almacenamiento y la consulta de información sobre los productos y sus movimientos a lo largo de la cadena. En las cadenas agroalimentarias contribuyen a mejorar la trazabilidad y la transparencia entre los actores (Sengupta y Kim, 2021).

4.2.5. Sostenibilidad y gobernanza

El tercer bloque incorpora los criterios con que se valora una intervención logística, que no debe limitarse a los costos, sino considerar de manera integrada los resultados económicos, ambientales y sociales, de acuerdo con el enfoque del triple resultado propuesto por Elkington (1997). En el ámbito de las cadenas de suministro, Carter y Rogers (2008) plantean que la sostenibilidad surge de la integración estratégica y transparente de estas tres dimensiones para mejorar el desempeño de la organización y de la cadena en el largo plazo. Este enfoque mantiene su vigencia en la literatura reciente, que continúa integrando las metas económicas, ambientales y sociales en la gestión sostenible de las cadenas de suministro (Gonçalves et al., 2024). Por tanto, permite establecer criterios e indicadores verificables para evaluar la viabilidad económica, el impacto ambiental y los efectos sociales de la intervención logística.

Ese desempeño se organiza en torno a las tres dimensiones del triple resultado (Elkington, 1997; Carter y Rogers, 2008). La dimensión económica atiende la eficiencia operacional: costos de transporte y almacenamiento, aprovechamiento de la capacidad instalada y pérdidas por manipulación o espera. La dimensión ambiental se ocupa de la huella del sistema, en particular del consumo de combustible y del desperdicio de producto. La social recoge el efecto sobre las comunidades productoras: las condiciones de trabajo, el reparto del beneficio entre eslabones y la capacidad de negociación de los actores con menor poder relativo.

A estas tres dimensiones se suma una condición transversal: la gobernanza. La coordinación entre actores autónomos no ocurre de forma espontánea, como lo evidencia que apenas el 27,4 % de los operadores logísticos encuestados por Matusiewicz (2024) emplea esquemas compartidos, siendo las empresas pequeñas las más reacias a adoptarlos. Por ello, la coordinación requiere reglas explícitas sobre quién decide, con qué información y bajo qué criterios. En ausencia de esas reglas, las mejoras técnicas en cualquiera de las tres dimensiones tienden a no sostenerse en el tiempo.

4.2.6. El modelo de coordinación logística

La noción que reúne los elementos anteriores es la de modelo de coordinación logística, que comprende los mecanismos con que se coordinan las actividades y decisiones logísticas entre los actores de un sistema. Kmiecik (2022) distingue tres mecanismos de coordinación: de red de mercado, social y jerárquico según si la articulación se resuelve por transacción bilateral, por acuerdo entre pares o por una autoridad que centraliza las decisiones.

El modelo de coordinación logística integra los tres bloques anteriores: actúa sobre un sistema logístico inserto en una cadena productiva agroalimentaria y define el esquema de distribución con el que opera; su formulación recurre a las herramientas de análisis para escoger

entre alternativas y a las tecnologías de información que sostienen la operación; y requiere reglas de gobernanza, pues sin ellas la coordinación entre actores autónomos no se sostiene en el tiempo ni alcanza los criterios de sostenibilidad esperados.

La evaluación ex ante se realiza antes de implementar una intervención y busca anticipar sus efectos mediante la comparación entre una situación de referencia y uno o más escenarios propuestos. Este tipo de evaluación sustenta la toma de decisiones al identificar beneficios, costos, riesgos y condiciones necesarias para la implementación, a partir de la evidencia disponible y de supuestos explícitos (European Commission, 2023). Por su carácter prospectivo, sus resultados constituyen estimaciones y no efectos observados; en consecuencia, deben validarse posteriormente mediante pruebas piloto o una evaluación ex post.

5. Metodología

El estudio se desarrolla bajo un enfoque mixto, con alcance descriptivo y propositivo. Se combinan técnicas cualitativas y cuantitativas para caracterizar y diagnosticar el sistema logístico de distribución de piña, tomando al productor como actor focal. Las entrevistas permiten identificar las prácticas, percepciones y problemáticas reportadas por los actores, mientras que la lista de chequeo permite valorar cuantitativamente el cumplimiento de criterios técnicos y logísticos. La observación directa se emplea como fuente de contraste para verificar las condiciones y prácticas evidenciadas durante las actividades de campo. De manera complementaria, la guía de observación de pérdidas permite registrar los eventos de pérdida identificados en las jornadas de campo. La integración de estas fuentes permite contrastar la información reportada con las condiciones observadas y establecer los principales puntos críticos que posteriormente orientan el diseño del modelo de coordinación logística.

El trabajo se organiza en cinco fases: caracterización del sistema logístico, diagnóstico de sus condiciones actuales, evaluación y selección del esquema de coordinación logística y de

las tecnologías accesibles, diseño del modelo de coordinación logística y evaluación ex ante de sus resultados. Cada fase responde a un objetivo específico y se describe a continuación con sus actividades, los participantes cuando corresponde y los instrumentos empleados.

En cuanto al orden de ejecución, la revisión de literatura y de fuentes secundarias oficiales precede al trabajo de campo: a partir de ella se construye el contexto territorial y productivo del municipio y se diseñan los instrumentos de recolección, que se aplican entre junio y julio de 2025. Las entrevistas y las jornadas de observación se emplean después en dos momentos distintos: primero para caracterizar el sistema y, sobre esa base, para diagnosticar sus puntos críticos.

5.1. Fase 1: Caracterización del sistema logístico

Esta fase corresponde al objetivo específico 1 y permite establecer las condiciones actuales del sistema logístico asociado al despacho de piña desde Lebrija, Santander hacia la Central de Abastos de Bucaramanga. Se identifican los actores que participan en estas actividades, los procesos que realizan, los flujos que los conectan y los recursos que emplean.

Actividades desarrolladas:

- Revisión de fuentes oficiales, entre ellas las Evaluaciones Agropecuarias Municipales, DANE, ICA y Agrosavia, para establecer el contexto territorial y productivo de Lebrija, Santander.
- Consulta de la base de datos Compite 360 para identificar empresas registradas en actividades relacionadas con la producción agrícola, el transporte y la comercialización del municipio de Lebrija, Santander.
- Realización de cinco jornadas de observación directa en campo para registrar las actividades del proceso productivo, desde la preparación del terreno hasta el cargue y el transporte.

- Aplicación de 58 entrevistas semiestructuradas a 56 participantes: 21 productores, 15 transportistas, 21 comercializadores y un ingeniero agrónomo. Dos participantes se entrevistan en dos roles, debido a que desarrollan actividades tanto de producción como de comercialización.
- Clasificación de actores y elaboración del diagrama de flujo del despacho a partir de la información obtenida en las entrevistas y de las observaciones realizadas en campo.

Participantes:

La selección de los participantes se realiza mediante un muestreo no probabilístico por conveniencia e intencional, considerando la disponibilidad y accesibilidad de los actores vinculados con la cadena productiva de piña. Como referencia para dimensionar el trabajo de campo, se consulta la base de datos Compite 360 de la Cámara de Comercio de Bucaramanga, que registra 160 empresas del sector agrícola en Lebrija, Santander, de las cuales 63 corresponden al subsector de frutas tropicales.

La conformación de los participantes se ve limitada por la dispersión geográfica de los productores en las diferentes veredas del municipio, la ausencia de una asociación o agremiación que los agrupe y las dificultades para establecer contacto directo con la totalidad de los actores registrados. Por esta razón, se recurre a diferentes espacios y contactos disponibles para acceder a los participantes. Entre ellos se incluye el Seminario Interactivo de Piña de Lebrija, donde se logra contactar a actores de la cadena, complementando esta participación con el contacto directo realizado durante las actividades de campo.

La muestra está conformada por 56 participantes: 21 productores, 15 transportistas, 21 comerciantes de la Central de Abastos de Bucaramanga y un ingeniero agrónomo con experiencia en el sector piñero de Lebrija, Santander. La selección busca incorporar diferentes perspectivas de los actores que intervienen en el proceso, por lo que la información obtenida

se utiliza para caracterizar y diagnosticar las condiciones del sistema, sin pretender realizar inferencias estadísticas ni generalizar los resultados a la totalidad de los productores del municipio.

Instrumentos:

La información primaria se recolecta entre junio y julio de 2025. Los instrumentos se presentan en los Apéndices A.1 a A.3.

Se elaboran cuatro guías de entrevista, dirigidas a productores, transportistas, comerciantes mayoristas de la Central de Abastos de Bucaramanga y un ingeniero agrónomo. Las preguntas abordan aspectos relacionados con las actividades productivas y logísticas, manejo poscosecha, pérdidas, transporte, comercialización, calidad y coordinación. Las entrevistas son semiestructuradas, con preguntas abiertas y repreguntas según las respuestas de cada participante, y tienen una duración aproximada de 30 a 45 minutos.

La guía de observación de pérdidas registra, para cada evento, la etapa, el tipo de pérdida (productiva, sanitaria, comercial, económica o fisiológica), su nivel de impacto (bajo, medio o alto), la causa y la medida correctiva. Se aplica durante cinco jornadas de campo en dos fincas de escalas contrastantes.

Resultado: caracterización del sistema logístico asociado al despacho de piña, con identificación de los actores participantes, los principales procesos, los flujos de producto e información y las condiciones de los recursos utilizados. Estos resultados se presentan en el Capítulo 6.

5.2. Fase 2: Diagnóstico del sistema logístico

La Fase 2 responde al objetivo específico 2 y se desarrolla a partir de la caracterización obtenida en la fase anterior. Su propósito es identificar las principales ineficiencias y puntos

críticos de coordinación logística en la distribución de piña, así como estimar las pérdidas poscosecha y cuantificar los costos asociados. Los resultados obtenidos permiten identificar las principales problemáticas del sistema logístico del productor y constituyen un insumo para el desarrollo de las fases posteriores.

La estructura de costos se construye desde la perspectiva del productor para una hectárea de piña del cultivar híbrido MD-2, conocido comercialmente como piña Gold, durante un ciclo productivo. Comprende los materiales e insumos, la mano de obra contratada y familiar valorada a precio de mercado, y los pagos logísticos asumidos por el productor, incluido el flete. Las pérdidas de producto, las mermas durante el transporte y los descuentos aplicados en destino se analizan por separado como efectos económicos que reducen el volumen comercializable o el ingreso recibido, con el fin de evitar su doble contabilización dentro del costo total. No se incluyen los costos ni los márgenes de intermediarios o comerciantes, ni los costos operativos propios del transportista.

Participantes: los mismos 56 participantes de la Fase 1, cuyas 58 entrevistas se reanalizan con propósito diagnóstico; la lista de chequeo se aplica sobre el proceso productivo observado en las cinco jornadas de campo.

Actividades desarrolladas:

- Se analizan las entrevistas y se contrastan sus resultados con las cinco jornadas de observación directa, con el fin de identificar problemas relacionados con la coordinación, el transporte, el manejo de información y la distribución.
- Se aplica la lista de chequeo para valorar las condiciones técnicas y logísticas del proceso productivo.

- Se clasifican las pérdidas observadas en campo por tipo y nivel de impacto, y su magnitud se estima en tres puntos de la cadena (finca, transporte y destino) a partir de lo declarado por productores, transportistas y comerciantes.
- Se analizan los costos de producción y distribución con base en la información suministrada por los productores y en referentes técnicos de Agrosavia. Finalmente, se integran los resultados para establecer los principales puntos críticos que afectan al productor.

Instrumentos:

El diagnóstico se apoya en los tres instrumentos descritos en la Fase 1, analizados con un propósito distinto: las entrevistas se procesan mediante análisis de contenido descriptivo, organizado en una matriz de participante por pregunta y en categorías temáticas, y los registros de las jornadas de observación se contrastan con lo declarado por los actores. A ellos se suma la lista de chequeo del proceso productivo.

La lista de chequeo está conformada por ocho ejes y 59 criterios técnicos y logísticos, valorados de 1 a 5. Los criterios se adaptan de Ríos Rojas et al. (2019). El resultado se calcula como porcentaje de cumplimiento sobre un máximo de 295 puntos, con igual peso para cada criterio. Antes de su aplicación, los criterios técnicos relacionados con cultivo, cosecha y manejo poscosecha son revisados por un ingeniero agrónomo con más de diez años de experiencia en el sector piñero de Lebrija, Santander; su aporte se considera un contraste técnico de informante calificado y no un proceso formal de validación mediante juicio de expertos. La lista se emplea para valorar las condiciones observadas y no corresponde a un modelo de madurez organizacional.

Resultado: diagnóstico de los principales puntos críticos de coordinación logística, pérdidas poscosecha y costos asociados a la distribución de piña. Estos resultados se presentan en el Capítulo 7.

5.3. Fase 3: Evaluación y selección del esquema de coordinación logística y de las tecnologías accesibles

Los puntos críticos priorizados en el diagnóstico de la Fase 2 delimitan el tipo de alternativa que resulta pertinente considerar. Esta fase responde al objetivo específico tres y resuelve dos decisiones de diseño previas a la estructuración del modelo: cómo se organiza la coordinación entre los productores, incluidos el flujo físico de la carga y el flujo de decisiones, y con qué herramientas se sostiene el intercambio de información que esa coordinación requiere. Cada decisión se aborda mediante una matriz de evaluación multicriterio independiente, con criterios propios derivados de los puntos críticos del diagnóstico, dado que los atributos que diferencian a las alternativas de coordinación no son los que diferencian a las herramientas tecnológicas.

Actividades desarrolladas:

- Se realiza una revisión de literatura y fuentes técnicas para identificar alternativas relacionadas con la coordinación de la información, la trazabilidad, la consolidación de cargas y la gestión de las actividades de distribución. A partir de esta revisión se conforma un conjunto de alternativas consideradas pertinentes para las condiciones del estudio.
- A partir de los puntos críticos priorizados en el diagnóstico, se definen los criterios que permiten valorar la capacidad de cada alternativa para responder a las problemáticas identificadas.
- Los esquemas de coordinación logística se evalúan mediante una matriz multicriterio ponderada según cuatro criterios: coordinación entre actores, capacidad de transporte, registro y trazabilidad, y esfuerzo de implementación en las condiciones del municipio.
- Las alternativas tecnológicas se evalúan con la misma matriz según seis criterios: aporte a la coordinación entre actores, trazabilidad, sostenibilidad ambiental y social, viabilidad técnica, accesibilidad económica y facilidad de adopción.

- Se comparan los resultados obtenidos para establecer el orden de prioridad de las alternativas y seleccionar aquellas con mejores condiciones para responder a los puntos críticos identificados.

Instrumentos: matriz de evaluación multicriterio, revisión de literatura y fichas técnicas de alternativas.

Resultado: selección de la alternativa de coordinación logística y jerarquización de las alternativas tecnológicas, incluidas las cuatro de mayor prioridad para el corto plazo. Estos resultados se presentan en el Capítulo 8 y delimitan los componentes que se estructuran en la Fase 4.

5.4. Fase 4: Diseño del modelo de coordinación logística

Los resultados obtenidos en las fases de caracterización, diagnóstico y evaluación de alternativas constituyen los insumos para la formulación del modelo de coordinación logística. Esta fase responde al objetivo específico 4 y busca estructurar un conjunto de mecanismos orientados a coordinar las actividades y decisiones logísticas entre los actores de la cadena productiva de piña. Para ello, se definen los componentes del modelo, las relaciones entre los actores, los flujos de información, de producto y de decisiones, y los procedimientos necesarios para soportar la consolidación de carga y la programación conjunta de despachos.

Actividades desarrolladas:

- Construcción del Mapa de Flujo de Valor (VSM) del estado actual para identificar las principales ineficiencias y oportunidades de coordinación en el sistema logístico actual.
- Diseño del modelo propuesto en tres componentes: flujo de información, flujo físico y flujo de decisiones; además, especificación de las relaciones entre ellos, identificando para cada

intercambio el actor responsable, el dato o la decisión que transfiere y el momento en que se produce.

- Definición de los mecanismos y reglas de coordinación necesarios para la operación del modelo, estableciendo la forma en que los actores intercambian información, coordinan la consolidación de carga y programan los despachos.
- Establecimiento de la relación entre los puntos críticos identificados en el diagnóstico y los componentes del modelo, justificando cómo cada mecanismo propuesto contribuye a atender las problemáticas identificadas.

Instrumentos: diagrama VSM del estado actual (Apéndice D), técnicas lean manufacturing y plantilla de consolidación de pedidos en Google Sheets (Apéndice B).

Resultado: modelo de coordinación logística para los productores de piña. Este resultado se presenta en el Capítulo 9.

5.5. Fase 5: Estimación de resultados

Una vez formulado el modelo de coordinación logística, esta fase responde al objetivo específico 5 y busca evaluar ex ante los aportes potenciales de los mecanismos de coordinación propuestos frente a las condiciones identificadas en el diagnóstico. La evaluación se realiza mediante el análisis de la relación entre las problemáticas detectadas en el sistema logístico y los componentes incorporados en el modelo, con el fin de identificar su contribución potencial a la coordinación de los despachos, el aprovechamiento del transporte y el intercambio de información entre los actores. Para operacionalizar estas dimensiones, se analiza principalmente la consolidación de carga frente al aprovechamiento del transporte, la programación conjunta frente a la coordinación de los despachos y los mecanismos de información frente al intercambio, el registro y la trazabilidad; sus efectos transversales se valoran posteriormente frente a los cinco puntos críticos.

Actividades desarrolladas:

- Análisis de la contribución potencial de la consolidación de carga frente a las problemáticas asociadas al transporte individual, la subutilización de la capacidad vehicular y los costos de distribución.
- Análisis de la contribución potencial de los mecanismos de intercambio de información para atender los puntos críticos relacionados con la comunicación, el registro de información y la coordinación entre productores.
- Análisis de la contribución potencial de la programación conjunta de despachos frente a las problemáticas de planificación identificadas en el sistema logístico.
- Valoración del aporte potencial del modelo frente a los puntos críticos identificados en el diagnóstico.
- Formulación de recomendaciones para el desarrollo de pruebas piloto, validaciones futuras o procesos de implementación en el territorio.

Instrumentos: comparativa de costos por rubro, comparación de escenarios de precio, indicadores ambientales y los datos de costos y pérdidas levantados en el diagnóstico.

Resultado: identificación de los beneficios potenciales, limitaciones y oportunidades asociadas a la futura implementación del modelo de coordinación logística en el sistema logístico de los productores de piña de Lebrija, Santander. Este resultado se presenta en el Capítulo 10.

Las cinco fases descritas operan de forma encadenada, en la que el resultado de cada una constituye el insumo de la siguiente. La Tabla 5 sintetiza esa secuencia en la matriz de consistencia del estudio, que relaciona cada objetivo específico con el aspecto del problema que atiende, los métodos e instrumentos empleados, el resultado obtenido y el capítulo donde

se reporta. La secuencia culmina con el diseño del modelo de coordinación logística (OE4) y su evaluación ex ante (OE5).

Tabla 5.
Matriz de consistencia entre objetivos, métodos, resultados y evidencia

Objetivo	Aspecto del problema que atiende	Método e instrumento	Resultado obtenido	Evidencia
OE1	Estructura de la cadena y actores que la componen	Revisión de fuentes oficiales (EVA, DANE, ICA, Agrosavia y Compite 360), cinco jornadas de observación directa en campo y aplicación de entrevistas semiestructuradas.	Línea base del sistema: actores clasificados, procesos, flujos de producto e información y recursos	Capítulo 6
OE2	Puntos críticos de coordinación logística, pérdidas poscosecha y costos y condiciones económicas del productor	Análisis cualitativo de entrevistas, lista de chequeo valorada y guía de observación de pérdidas; análisis de costos por rubro	Dictamen diagnóstico: porcentaje de cumplimiento del 52,9 %, tipos de pérdida cuantificados y estructura de costos por hectárea	Capítulo 7
OE3	Coordinación entre actores mediante tecnología accesible	Revisión de literatura y fuentes técnicas; matriz multicriterio para los esquemas de coordinación y matriz multicriterio con seis criterios ponderados para las tecnologías, y fichas técnicas de alternativas	Selección del esquema de coordinación colaborativa en ruta multipunto, y jerarquización de nueve alternativas tecnológicas con selección de las cuatro de prioridad alta	Capítulo 8
OE4	Coordinación de las actividades y decisiones logísticas entre los actores de la cadena	Diseño por componentes, definición de los mecanismos y reglas de coordinación, VSM del estado actual como punto de partida y trazabilidad entre los puntos críticos del diagnóstico y los componentes del modelo	Modelo de coordinación logística de tres componentes, con sus relaciones, sus mecanismos y reglas de coordinación, sus indicadores de desempeño y los procedimientos de consolidación de carga y programación conjunta de despachos	Capítulo 9
OE5	Aporte potencial del modelo frente a los puntos críticos identificados en el diagnóstico	Análisis de la contribución potencial de la consolidación de carga, el intercambio de información y la programación conjunta de despachos, con comparación del	Valoración del aporte potencial del modelo frente a los puntos críticos, con el ahorro y la reducción de emisiones proyectados bajo supuestos declarados y	Capítulo 10

Objetivo	Aspecto del problema que atiende	Método e instrumento	Resultado obtenido	Evidencia
		escenario actual y el propuesto por rubros de costo y emisiones y contraste bajo escenario de precio desfavorable	recomendaciones para pruebas piloto	

6. Caracterización del sistema logístico de los productores de piña de Lebrija, Santander

6.1. Caracterización territorial del municipio de Lebrija, Santander

El municipio de Lebrija, Santander, es el mayor productor de piña (Ananas comosus) del departamento, con el 54 % del área sembrada en Santander en 2024 (UPRA, 2025); su evolución productiva se detalla en el apartado 6.2.

Dos aspectos técnicos del cultivo de piña MD2 son relevantes para la cadena logística (Tabla 6). El primero es el contenido de sólidos solubles, que sirve como criterio para determinar la madurez y programar la cosecha y el despacho; para la piña fresca, el Codex Alimentarius establece un mínimo de 12 °Brix. El segundo es la generación estimada de 200 a 250 toneladas de residuos orgánicos por hectárea cosechada, cuya gestión representa un desafío de sostenibilidad y logística inversa. En cuanto a la distribución, uno de los principales retos es la dispersión geográfica de las fincas, pese a la alta concentración productiva del municipio.

La dispersión, sin embargo, no es uniforme. Los 21 productores entrevistados reportan fincas en diez veredas del municipio. Ocho de ellos (38 %) se ubican en La Aguada, que concentra además 32 de los 77 despachos semanales registrados. Le siguen El Salado y La Puente con tres productores cada una y Santo Domingo con dos, mientras que las seis veredas restantes (Aguirre, El Oso, Piedras Negras, Manchadores, Santero y Santa Rosa) registran un productor cada una; uno de ellos tiene fincas en Santero y en Santa Rosa.

Tabla 6.
Parámetros técnicos de la variedad MD2 relevantes para la cadena logística

Característica / Aspecto Clave	Descripción
Variedad cultivada	Gold MD-2 (Ananas comosus), variedad predominante en Lebrija, Santander y objeto del presente estudio.
Densidad de siembra	38.000 plantas por hectárea, mediana de lo reportado por los productores entrevistados en un rango de 35.000 a 40.000. El análisis de costos del numeral 7.3 adopta la densidad de 50.000 plantas del predio tomado como referencia, según se declara en ese apartado.
Rendimiento promedio	45,0 t/ha en Lebrija, Santander (2023-2024); entre 41,9 y 42,8 t/ha en Santander durante el período 2019–2024; 42,17 t/ha a nivel nacional (2018).
Calidad: sólidos solubles	Mínimo de 10 °Brix para calidad industrial; el Codex Alimentarius exige un mínimo de 12 °Brix.
Calidad: acidez	Acidez máxima del 1 % según el Codex Alimentarius.
Residuos de cosecha	Entre 200 y 250 toneladas de residuos orgánicos por hectárea cosechada; su tratamiento convencional mediante quema química y física afecta la fertilidad del suelo, las fuentes hídricas y el aire.
Participación en el mercado nacional	33,59 % de las exportaciones de frutas tropicales de Colombia (2018) y 59 % del consumo aparente nacional de frutas tropicales (2016).

Nota. Adaptado de Ríos Rojas et al. (2019) y Díaz Lizarazo et al. (2020).

Según fuentes institucionales (Compite 360, EVA y reportajes regionales), la producción municipal se concentra en los corregimientos de El Centro y Vanegas, distribución que condiciona la organización del transporte hacia los mercados de destino. Esta concentración corresponde al municipio en su conjunto y no a la muestra: la entrevista registró la vereda de cada productor, pero no el corregimiento, y los productores entrevistados se ubican principalmente en La Aguada, El Salado y La Puente.

6.2. Contexto productivo nacional, departamental y municipal

Santander lidera la producción nacional de piña con una participación del 43 %, seguido por Valle del Cauca (14 %) y Meta (12 %). Dentro del departamento, Lebrija, Santander, concentra el 54 % del área sembrada y mantiene entre 2019 y 2024 una superficie estable entre 4.910 y 5.312 hectáreas, con una producción que oscila entre 231.525 y 258.150 toneladas

anuales y un rendimiento que desciende de 50,0 a 45,0 t/ha a partir de 2023 (Tabla 7). Esta estabilidad del área cultivada indica un volumen de producción recurrente a lo largo del período.

Tabla 7.
Área, producción y rendimiento de piña en Lebrija y Santander, 2019–2024

Año	Área sembrada Santander (ha)	Área sembrada Lebrija, Santander (ha)	Área cosechada Santander (ha)	Área cosechada Lebrija, Santander (ha)	Producción Santander (ton)	Producción Lebrija, Santander (ton)	Rend. Santander. (t/ha)	Rend. Lebrija, Santander. (t/ha)
2019	11.050	4.910	8.722	4.910	369.874	245.500	42,4	50,0
2020	9.505	5.144	9.093	4.908	388.206	245.400	42,7	50,0
2021	9.487	5.194	9.128	4.894	388.214	244.700	42,5	50,0
2022	9.501	5.206	9.403	5.163	402.840	258.150	42,8	50,0
2023	9.642	5.175	9.423	5.145	394.556	231.525	41,9	45,0
2024	9.847	5.312	9.677	5.167	407.155	232.515	42,1	45,0

Nota. Adaptado de UPRA (2025), Evaluaciones Agropecuarias Municipales (EVA), consulta de los registros de piña para Lebrija, Santander, correspondientes al período 2019–2024. El rendimiento corresponde al cociente entre producción y área cosechada.

6.3. Actores de la cadena productiva

La cadena involucra seis tipos de actores. Los directos (productores, transportistas y comerciantes mayoristas) intervienen físicamente en el flujo del producto y sus decisiones determinan el desempeño logístico. Los intermediarios consolidan carga sin transformar el producto, lo que añade un eslabón con demoras y pérdidas de calidad. El entorno institucional regula, asiste y financia la operación sin formar parte de ella, con cobertura territorial limitada según el experto consultado, y los clientes finales compran en la Central de Abastos o por canales secundarios. El ingeniero agrónomo entrevistado participa como informante técnico y no como eslabón (Tabla 8).

Sobre el eslabón inicial, Compite 360 registra en Lebrija, Santander, 160 empresas del sector agrícola, de las cuales 63 corresponden al subsector de frutas tropicales, en el que se ubica el cultivo de piña (Cámara de Comercio de Bucaramanga, s. f.). En transporte hay 54 empresas registradas en la región, que movilizan el producto en camiones de 5 toneladas bajo dos modalidades de cobro: $2.000 por canastilla cuando el productor asegura una carga cercana a la capacidad del vehículo, y una tarifa fija por viaje de entre $400.000 y $500.000 cuando la carga es menor o no se asegura por anticipado; el análisis adopta la tarifa por canastilla, que es la que declaran pagar 20 de los 21 productores, y usa $450.000 por viaje solo como referencia de la tarifa fija. Los comerciantes operan en las bodegas 2 y 3 de la Central, que reúnen 60 locales de frutas, y evalúan la calidad sin criterios técnicos estandarizados, negociando precios a diario.

De los seis tipos, productores, transportistas y comerciantes son indagados directamente mediante entrevistas; intermediarios, entidades de apoyo y clientes finales se caracterizan con fuentes secundarias y con las referencias de los actores entrevistados.

Tabla 8.
Actores, roles y etapas de la cadena productiva de piña en Lebrija, Santander

Etapa	Actor	Rol
Producción	Productores agrícolas	Cultivan, cosechan y empacan la piña.
Intermediación	Intermediarios	Recogen piña para consolidar cargas.
Transporte	Transportistas o empresas de carga	Movilizan el producto hacia Bucaramanga.
Comercialización	Comerciantes / Distribuidores	Venden la piña en la Central de Abastos.
Apoyo	ICA y entidades gubernamentales	Asesoría técnica, regulación y control.
Consumo	Minoristas, compradores individuales, distribuidores nacionales	Consumen el producto.

Las entidades del entorno institucional no intervienen directamente en el flujo físico de la piña, pero brindan regulación, asistencia técnica, financiación y otros servicios de apoyo. Aunque pueden facilitar la implementación de iniciativas de coordinación mediante

capacitación, acompañamiento y recursos, actualmente ninguna de las ocho entidades identificadas ejerce funciones de coordinación logística entre los actores de la cadena. Por tanto, la articulación de los flujos físicos y de información no cuenta con un responsable institucional (Tabla 9).

Tabla 9.
Entidades del entorno institucional de la cadena productiva de piña en Lebrija, Santander

Nombre de la entidad/asociación	Tipo	Funciones principales	Cobertura
Gobernación de Santander	Gubernamental departamental	Convocatorias productivas, promoción de BPA, fortalecimiento comercial.	Santander
Alcaldía de Lebrija	Gubernamental municipal	Coordinación local del sector agrícola, gestión de empleo rural y articulación con productores piñeros del municipio.	Lebrija, Santander
Cámara de Comercio de Bucaramanga	Gremial regional	Registro mercantil, fortalecimiento empresarial y suministro de información sectorial a través de la plataforma Compite 360.	Área metropolitana de Bucaramanga
Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR)	Gubernamental nacional	Incentivos, asistencia técnica, acceso a crédito, programas de desarrollo rural.	Nacional
ICA (Instituto Colombiano Agropecuario)	Gubernamental técnica	Certificación sanitaria, regulación de BPA, control fitosanitario.	Nacional y regional
Agronet (MADR)	Plataforma institucional	Registro y consulta de asociaciones, acceso a información técnica.	Nacional
Finagro (Fondo para el Financiamiento del Sector Agropecuario)	Entidad financiera de segundo piso	Provisión de líneas de crédito de fomento, garantías y subsidios para productores agropecuarios.	Nacional
Banco Agrario de Colombia	Banca pública de fomento	Otorgamiento de crédito agropecuario y servicios financieros a productores rurales.	Nacional

Entre los actores circulan cuatro flujos (Tabla 10): el de producto, de las fincas a la Central de Abastos; el de información, por llamada y WhatsApp, sobre disponibilidad, despachos y transporte; el financiero, en sentido inverso, de los comerciantes a los productores; y el de retornos y rechazos, con las novedades de calidad que se comunican en destino.

Tabla 10.
Caracterización de los flujos de la cadena productiva de piña en Lebrija, Santander

Flujo	Origen	Destino	Contenido principal	Medio
Producto	Productores	Comerciantes mayoristas	Piña cosechada para comercialización	Transporte terrestre contratado individualmente
Información	Productores, transportistas y comerciantes	Entre los actores de la cadena	Disponibilidad de producto, coordinación logística, programación de despachos y condiciones de venta	Llamada telefónica y WhatsApp
Financiero	Comerciantes mayoristas	Productores	Pago asociado a la comercialización del producto	Efectivo o transferencia
Retornos y rechazos	Comerciantes mayoristas	Productores	Novedades asociadas a calidad, cantidades recibidas o producto rechazado	Comunicación verbal en destino

6.4. Procesos logísticos y flujo del proceso productivo

Los procesos logísticos de la cadena se organizan en tres fases: producción, transporte y comercialización (Tabla 11), cuya ejecución recae en actores distintos y sin mecanismos formales de enlace entre ellos. La fase de transporte es la única que involucra simultáneamente a productores, transportistas y comerciantes, lo que la convierte en el punto de la cadena donde la ausencia de coordinación tiene mayor efecto sobre el costo y la calidad del producto entregado. El diagrama de flujo completo del proceso se incluye en el Apéndice C.

Tabla 11.
Identificación del proceso logístico del sistema

Fase	Proceso
Producción	Siembra, mantenimiento, cosecha, clasificación y empaque.
Transporte	Cargue, desplazamiento, descargue, manejo de condiciones (tiempo de tránsito y protección de la fruta).
Comercialización	Venta al por mayor, distribución secundaria, presentación al consumidor.

El ciclo productivo, desde la preparación del terreno hasta la comercialización, toma entre 12 y 18 meses en condiciones normales, y en el predio que se toma como referencia para el análisis de costos (apartado 7.3) es de 15 meses; su secuencia completa, con las decisiones y las salidas de merma, se presenta en el Apéndice C. Como la fecha de cosecha queda definida

meses antes, desde la inducción floral, y la fruta madura debe despacharse en pocos días, el productor tiene poco margen para mover la fecha de despacho; por eso la coordinación del transporte debe planearse con anticipación.

Los recursos del cultivo se toman del manual técnico de Ríos Rojas et al. (2019) y se contrastan con lo observado en las jornadas de campo. Las instalaciones identificadas en las fincas se limitan a espacios destinados al almacenamiento de insumos y herramientas agrícolas, así como a equipos de apoyo al proceso productivo; no se trata de infraestructura logística asociada al despacho del producto. Durante las jornadas de campo no se identifican instalaciones destinadas al almacenamiento poscosecha del producto ni sistemas formales de trazabilidad asociados a las actividades de distribución (Tabla 12).

Tabla 12.
Recursos del sistema logístico

Categoría	Recurso
Material vegetal	Semillas (colinos) de piña MD2.
Materiales y suministros	Baldes 20 L, tanques, tazas plásticas, fertilizantes, fungicidas e insecticidas, herbicidas y coadyuvantes.
Maquinaria y equipos	Tractor, fumigadora de espalda, motor de fumigación, herramientas manuales (machetes, azadones, barras), equipos de protección personal (EPP).
Instalaciones	Cuarto o área de almacenamiento de insumos y herramientas agrícolas

Nota. Adaptado de Ríos Rojas et al. (2019, p. 30).

En síntesis, la línea base muestra 21 productores en diez veredas, con La Aguada como principal zona de despacho. Productores, transportistas y comerciantes mayoristas son los actores directos, unidos por cuatro flujos: producto, información, financiero y retornos. La información circula por llamada y WhatsApp, y cada productor contrata por su cuenta el transporte en camiones de 5 toneladas, con cobro por canastilla o por viaje; esta es la única fase que reúne a los tres actores directos. La cadena carece de almacenamiento poscosecha,

trazabilidad formal y una entidad que coordine la operación, condiciones que el capítulo siguiente diagnostica.

7. Diagnóstico del sistema logístico

El diagnóstico integra cuatro componentes: el análisis de entrevistas, la lista de chequeo, la guía de observación de pérdidas y el análisis de costos, con el fin de identificar los puntos críticos que afectan el cumplimiento del proceso, las pérdidas de producto y los costos del productor.

7.1. Análisis de entrevistas

La muestra comprende 58 entrevistas semiestructuradas a productores, transportistas y comerciantes, y una a un ingeniero agrónomo con más de diez años de experiencia en el sector piñero de Lebrija, incorporado como informante calificado para el contraste técnico. En promedio, el 72 % de la piña que venden los comerciantes proviene de Lebrija, Santander (entre el 20 % y el 100 %), de modo que la muestra cubre los tres eslabones entre la finca y la Central de Abastos y permite triangular la información. Las respuestas se analizan mediante análisis de contenido descriptivo sobre una matriz de participante por pregunta con códigos anonimizados (Apéndice A.1): en las numéricas se calculan rangos, media y mediana, y en las categóricas, la proporción de participantes. La Tabla 13 resume los hallazgos por grupo consultado.

Tabla 13.
Resumen de hallazgos por grupo consultado en las entrevistas semiestructuradas

Grupo consultado	Aspectos analizados	Principales hallazgos	Conclusiones
Productores	Características de los productores, escala de producción, prácticas	Predios entre 3 y 20 hectáreas y baja mecanización. Los 21 productores emplean canastillas plásticas y llevan registros manuales de insumos,	La producción opera de forma individual y con registros principalmente

Grupo consultado	Aspectos analizados	Principales hallazgos	Conclusiones
	productivas, cosecha, poscosecha, registros y asociatividad	jornales y fechas; ninguno utiliza medios digitales. La pérdida poscosecha total declarada se ubica entre el 5 % y el 15 %, con media de 11,0 % y mediana de 10,0 %; las respuestas no permiten separar de forma aditiva la pérdida en finca de la ocurrida durante el transporte. La planificación de la cosecha y el despacho no está formalizada ni coordinada entre actores. Ningún productor pertenece a una asociación, aunque 19 de los 21 manifiestan disposición para adoptar herramientas accesibles. También se identifica acompañamiento técnico limitado.	manuales, lo que limita la trazabilidad, la coordinación de los despachos y la cooperación entre productores.
Transporte	Transporte, experiencia, infraestructura, costos, coordinación logística.	Los transportistas reportan mal estado de las vías rurales y aumento de los costos de combustible. La tarifa fija se encuentra entre $400.000 y $500.000 por viaje, con $450.000 como valor de referencia; también se registra el cobro por canastilla. La merma durante el traslado se ubica entre el 1 % y el 3 % media 2,1 % y mediana 2,0 %. Trece de los quince transportistas sitúan el daño en el cargue y el descargue, mientras que los quince señalan que la pérdida es asumida por el productor. Ningún vehículo cuenta con refrigeración y la coordinación se realiza mediante llamadas o WhatsApp. Se presentan cargas incompletas y viajes contratados individualmente.	Aunque los viajes se acuerdan previamente, no existe una planificación integrada entre productores, transportistas y comerciantes ni mecanismos para consolidar cargas y articular las rutas.

Grupo consultado	Aspectos analizados	Principales hallazgos	Conclusiones
Comerciantes (Central de Abastos)	Recepción del producto, evaluación de calidad, descuentos, precios, comunicación y trazabilidad.	Los comerciantes reportan precios variables y negociaciones diarias. El descuento aplicado por calidad se ubica entre el 1 % y el 10 % del valor recibido, media 5,6 % y mediana 5,0 % y se determina mediante inspección visual. Ninguno de los 21 comerciantes utiliza instrumentos técnicos de medición ni exige certificaciones. Todos tienen proveedores fijos en Lebrija y conocen el origen del producto, pero esta información no se registra formalmente. La comunicación con los productores es limitada.	La ausencia de criterios verificables de calidad y de registros compartidos limita la transparencia de los descuentos, dificulta la trazabilidad y afecta la coordinación entre productores y comerciantes.
Informante técnico: ingeniero agrónomo	Pérdidas poscosecha, causas técnicas, asistencia técnica, adopción de BPA y programas de apoyo.	El informante técnico estima una pérdida global del 10 % y distribuye el valor perdido en 60 % en producción, 25 % en transporte y 15 % en comercialización. Identifica como causas principales las enfermedades, la manipulación durante el transporte y la madurez insuficiente. También señala una cobertura técnica limitada, baja adopción de buenas prácticas agrícolas y escasez de recursos para capacitación.	Su apreciación coincide parcialmente con los resultados de productores y transportistas al situar las pérdidas en la cosecha, la manipulación y el transporte. Por tratarse de un único informante, su aporte constituye un contraste técnico y no una validación formal.

- **Productores:** Los 21 entrevistados suman 213 hectáreas, en predios de 3 a 20 hectáreas, y despachan en promedio 3,7 veces por semana. Registran a mano insumos, jornales y fechas, y deciden el corte por color, olor o calendario: solo 2 de los 21 usan grados Brix. Frente a los requerimientos de calidad y al ingreso del productor, estas prácticas generan tres puntos críticos.

El primero es de sincronización. El viaje al comprador toma 1,8 horas en promedio, pero 19 de los 21 han sufrido demoras, que se acumulan en los extremos del trayecto. En la finca no hay almacenamiento ni refrigeración: la fruta se corta y empaca de madrugada y espera a la sombra la llegada del vehículo. En destino, los comerciantes tampoco refrigeran y no conservan la fruta más de uno o dos días. La coordinación entre el corte, el vehículo y la recepción se resuelve caso a caso por teléfono, sin compromiso verificable.

El segundo es el tamaño y el reparto de la pérdida. La pérdida poscosecha declarada tiene una mediana del 10 %, con casos del 5 % al 15 %. Que la diferencia sea de tres a uno entre fincas de igual variedad, zona y clima sugiere que la causa está en el manejo de cada predio más que en el entorno. Ocho de los 21 ubican la mayor pérdida entre el corte y la entrega (cosecha, manipulación, transporte o vías), un tramo que comparten productor y transportista y en el que no hay un criterio común de manipulación ni un responsable de la fruta en tránsito.

El tercero es de información. Ningún productor registra pérdidas ni ventas, de modo que sus cifras provienen de la memoria. Tampoco tienen una referencia de precio: los 21 se informan con otros productores, consideran injusto el precio que reciben, y 12 de ellos, con 118 de las 213 hectáreas, lo señalan como su problema más crítico. Solo 5 reportan daño durante el transporte, aunque varios describen fruta que se deteriora en la bodega del cliente: el productor no sabe qué ocurre tras la entrega y el comerciante descuenta sin precisar dónde se originó el daño, por lo que el productor no puede corregir la práctica ni discutir el descuento.

- **Transportistas:** Los 15 entrevistados tienen 10,5 años de experiencia en promedio y hacen de 3 a 6 viajes por semana, en vehículos de 2,35 a 11 toneladas (5,24 en

promedio); el límite de cinco toneladas responde al acuerdo sobre el estado de las vías rurales y no a la capacidad del vehículo. De las cerca de 6,07 horas que dura el ciclo, 3,53, cerca del 58 %, corresponden al cargue y el descargue. El cuello de botella está, por tanto, en los extremos del viaje, el mismo punto donde los transportistas ubican el daño.

Declaran perder el 2,1 % de la carga, con un rango del 1 % al 3 %; 13 de los 15 ubican la pérdida en el cargue y el descargue, y 11 la atribuyen a la manipulación. En los 15 casos la asume el productor y solo 3 registran reclamos formales, así que quien transporta no tiene incentivo para reducirla. Como la carga no se revisa al entregarla ni al recibirla, tampoco se puede saber si el daño viene de la finca, del vehículo o del descargue. Los viajes se pactan con 7,8 días de anticipación, pero sin confirmar horarios ni cupos, y 11 de los 15 reportan esperas para descargar en la Central. Ninguno considera buenas las vías rurales, ninguno tiene refrigeración ni herramientas digitales de gestión, y 13 no conocen su costo mensual de operación.

- **Comerciantes:** En la Central no se devuelve el producto: los 21 comerciantes descuentan del pago la fruta dañada, en promedio, el 5,6 % del valor, con casos entre el 1 % y el 10 %. El descuento se fija por inspección visual, sin instrumento de medición, sin una norma acordada de calibre o madurez y sin exigir certificaciones, de modo que el comprador lo decide de forma discrecional y el productor no tiene evidencia para controvertirlo. La recepción sí tiene orden: días fijos de mercado y pedidos con 7,9 días de anticipación, casi los mismos 7,8 que declaran los transportistas. Sin embargo, ninguna bodega tiene refrigeración ni conserva la fruta más de uno o dos días, y la concentración de la recepción en pocos días explica las esperas para descargar. Además, 15 de los 21 atribuyen el daño al tramo logístico y todos conocen la procedencia de cada lote, pero ninguno la registra por escrito.

- **Contraste técnico:** El ingeniero agrónomo, ajeno a la cadena, es un único informante, por lo que sus cifras sirven de contraste y no constituyen una cuarta muestra. Estima la pérdida en 10 %, igual que la mediana de los productores, y la ubica en la cosecha y el transporte, en línea con los 13 de 15 transportistas que señalan el cargue y el descargue. Difiere en el reparto del valor perdido, que atribuye en un 60 % a la producción, un 25 % al transporte y un 15 % a la comercialización, y estima un costo de transporte superior al que declaran los transportistas. Señala, además, que la consolidación de cargas entre productores ya se ha intentado antes en la zona.

En conjunto, los tres grupos y el agrónomo describen una cadena con cierto orden (pedidos con unos ocho días de anticipación, entregas en días fijos y comunicación por teléfono o mensajería), sostenido en la costumbre y no en reglas acordadas. De ahí se derivan tres vacíos de coordinación, que corresponden a los puntos críticos descritos: el despacho se compromete antes de conocer el estado de la carga; el paso entre eslabones, donde todas las fuentes sitúan el daño, no se verifica ni se documenta; y sin registros compartidos de precio, calidad y pérdida no es posible negociar sobre una base común ni establecer el origen de lo perdido. Como los tres ocurren entre actores, ninguno puede resolverlos por separado: requieren un acuerdo entre las partes, que es lo que provee un mecanismo de coordinación.

La observación de campo complementa este cuadro. De las diez pérdidas registradas (Apéndice A.3), cuatro coinciden con lo relatado: la cosecha antes del punto óptimo, el marchitamiento por almacenamiento sin cubierta, el daño por empaque y la falta de monitoreo fitosanitario. De las seis restantes, cinco corresponden a etapas del cultivo que las entrevistas no indagan y una al transporte, donde la observación identifica daños por la forma de estibar que ningún actor documenta.

Estos hallazgos provienen de muestras no probabilísticas y de respuestas autodeclaradas, por lo que describen a los entrevistados y no a toda la cadena. Tampoco permiten establecer si hay balance entre demanda y capacidad de transporte, aunque las esperas y los viajes incompletos apuntan a un problema de sincronización más que de disponibilidad de vehículos. El precio, que los productores priorizan, responde a la asimetría frente al intermediario y excede los puntos críticos de coordinación logística. En síntesis, el productor asume los costos del cultivo y el flete, una pérdida poscosecha total declarada con mediana del 10 %, la merma en transporte reportada por este actor (2,1 %) y los descuentos en destino (5,6 %), pero estas tres cifras no se suman: la merma del transporte puede estar contenida en el porcentaje total y el descuento puede valorar el mismo deterioro físico. La ausencia de registros impide establecer su independencia y el origen exacto de la pérdida.

7.2. Análisis técnico

7.2.1. Lista de chequeo del proceso productivo

La lista de chequeo descrita en la Fase 2 se aplica al proceso productivo de la piña MD2 tal como se observa en las cinco jornadas de campo, de modo que la valoración corresponde al proceso predominante en las dos fincas observadas y no a un predio en particular. En la escala empleada, 1 indica que la práctica no se realiza o el recurso no existe y 5 que la práctica se realiza de manera completa y estandarizada. Los puntajes se asignan por consenso entre las investigadoras, contrastando lo reportado en las entrevistas con lo observado en campo. El porcentaje de cumplimiento global se calcula aplicando la Ecuación 1.

Ecuación 1. Fórmula para el cálculo del porcentaje de cumplimiento del proceso productivo

$$\text{Porcentaje de cumplimiento (\%)} = \frac{\sum \text{Puntajes obtenidos}}{\text{Valor máximo posible}} \times \mathbf{100}$$

Sustituyendo los valores correspondientes:

$$\text{porcentaje de cumplimiento (\%)} = \frac{156}{295} \times 100 = 52{,}9\%$$

El instrumento no corresponde a un modelo formal de madurez organizacional, por lo que el resultado se reporta como porcentaje de cumplimiento sobre el puntaje máximo posible, asignando igual peso a todos los criterios. Como la escala parte de 1, el puntaje mínimo posible es de 59 puntos, equivalente al 20 %, de modo que el 52,9 % debe leerse sobre ese piso. La Tabla 14 presenta el resultado por eje de evaluación.

Tabla 14.
Porcentaje de cumplimiento del proceso productivo por eje de evaluación

Eje de evaluación	Puntaje obtenido	Puntaje máximo	Nivel de cumplimiento
1. Planeación y preparación del terreno	18	30	60,0 %
2. Siembra, riego e inducción floral	37	45	82,2 %
3. Planeación e infraestructura logística	20	40	50,0 %
4. Cosecha	20	20	100,0 %
5. Poscosecha y comercialización	12	35	34,3 %
6. Transporte y distribución	28	50	56,0 %
7. Gestión de la información y trazabilidad	10	35	28,6 %
8. Costos, eficiencia y sostenibilidad logística	11	40	27,5 %
Total	**156**	**295**	**52,9 %**

Nota. El detalle de los 59 criterios valorados se incluye en el Apéndice A.2.

Los resultados separan la ejecución agronómica de la gestión de la información: la cosecha alcanza el 100 % y la siembra, el riego y la inducción floral el 82,2 %, mientras la

poscosecha y comercialización, la trazabilidad y los costos logísticos quedan entre el 27,5 % y el 34,3 %. La comunicación entre actores obtiene 4 sobre 5, pero el registro de actividades, el seguimiento de tiempos, los sistemas de información y el análisis de costos reciben la valoración mínima: los actores se comunican, pero sin información verificable sobre la cual coordinarse. Por ello, la intervención se concentra en la poscosecha, la trazabilidad y el análisis económico.

7.2.2. Análisis de pérdidas

El registro de pérdidas se elabora con una guía de observación estructurada (Tabla 15), aplicada en cinco jornadas de campo entre el 10 de junio y el 18 de julio de 2025 en dos fincas de escalas contrastantes: Los Pinos, en la vereda El Salado (38 ha de área total, 20 en producción), y Bellavista, en La Aguada (12 ha, 7 en producción). Los diez eventos registrados van desde la preparación del terreno hasta el transporte y describen esas dos fincas, no el municipio; tampoco se observan las operaciones de la Central de Abastos ni la venta al consumidor final. El impacto de cada pérdida se clasifica según su recuperabilidad y el costo de corregirla: bajo, si afecta unidades aisladas y se corrige ajustando la práctica existente, sin inversión; medio, si afecta una porción del lote, obliga a reclasificar o reprocesar el producto y requiere un cambio de procedimiento o un recurso de bajo costo; y alto, si compromete el lote o la entrega completa, no es recuperable y exige inversión en infraestructura o equipamiento.

Tabla 15.
Pérdidas registradas en la guía de observación del sistema logístico

N°	Área / Etapa	Pérdida clave identificada	Tipo de pérdida	Impacto	Causa principal	Medida correctiva
1	Preparación del terreno	Encharcamiento / pudrición por mal drenaje	Productiva	Medio	Mala preparación del terreno	Construir drenajes y dejar la inclinación adecuada para que fluya el agua
2	Material vegetal	Uso de colinos enfermos o mal clasificados	Sanitaria	Medio	Selección deficiente	Desinfectar y clasificar el material vegetal

N°	Área / Etapa	Pérdida clave identificada	Tipo de pérdida	Impacto	Causa principal	Medida correctiva
3	Siembra	Colinos mal sembrados	Productiva	Bajo	Falta de capacitación	Entrenamiento en técnicas de siembra
4	Riego y fertilización	Estrés hídrico	Fisiológica	Alto	Riego no ajustado al suelo	Plan de riego adecuado
5	Manejo fitosanitario	Brotes de enfermedades por monitoreo deficiente	Sanitaria	Medio	No se detectan a tiempo	Monitoreo regular y registro de plagas
6	Cosecha	Fruta de bajo peso o con daño físico	Comercial	Medio	Cosecha anticipada	Cosechar según Brix y capacitar a los cosecheros
7	Poscosecha	Marchitamiento por almacenamiento inadecuado	Económica	Bajo	Almacenamiento a la intemperie	Almacenar bajo cubierta y reducir el tiempo entre cosecha y despacho
8	Inducción floral	Producción no uniforme	Productiva	Bajo	Aplicación mal programada	Programar la inducción por lote y registrar la fecha de aplicación
9	Embalaje	Golpes y aplastamiento por mal empaque	Comercial	Bajo	Mala clasificación y poco cuidado al momento de empacar la carga	Estandarizar y definir un proceso para empacar
10	Transporte	Daños durante el traslado	Económica	Bajo	Mala estiba	Estibar en canastillas apilables y asegurar la carga durante el traslado

Las diez pérdidas registradas se agrupan en cinco tipos para establecer el peso relativo de cada uno. La pérdida productiva corresponde a unidades o peso perdidos durante el cultivo y la cosecha; la sanitaria, a plagas, enfermedades o contaminación del producto; la comercial, a la pérdida de valor por no cumplir las condiciones que exige el comprador; la económica, a la reducción del ingreso frente al esperado; y la fisiológica, a alteraciones en los procesos internos de la planta o del fruto. La distribución porcentual se calcula con la Ecuación 2.

Ecuación 2. Fórmula para el cálculo de la distribución porcentual de pérdidas

$$\text{Porcentaje} = \frac{\text{Frecuencia de la categoría}}{\text{Total de frecuencias}} \times \mathbf{100}$$

La Tabla 16 presenta el resultado. El instrumento registra la presencia de cada pérdida, su causa y su nivel de impacto, de modo que los porcentajes expresan frecuencia de ocurrencia y no magnitud del volumen perdido. La cuantificación económica de las pérdidas se desarrolla en el apartado 7.3, sobre el volumen comercializable y los precios por calibre reportados en las entrevistas.

Tabla 16.
Distribución porcentual de pérdidas por tipo

Tipo de pérdida	Frecuencia	Porcentaje
Productiva	3	30,00 %
Sanitaria	2	20,00 %
Comercial	2	20,00 %
Económica	2	20,00 %
Fisiológica	1	10,00 %
Total	**10**	**100,00 %**

Las pérdidas de tipo productivo concentran la mayor frecuencia (tres de diez registros), seguidas en igual proporción por las sanitarias, comerciales y económicas (dos registros cada una) y por las fisiológicas (uno). Seis de los diez eventos corresponden a etapas del cultivo previas a la cosecha, de modo que una parte de la merma se genera antes de que el producto entre en el tramo logístico. El modelo de coordinación puede actuar sobre los cuatro restantes: cosecha, poscosecha, embalaje y transporte.

La Tabla 17 aplica el mismo procedimiento de la Ecuación 2 a los niveles de impacto de las diez pérdidas registradas.

Tabla 17.
Incidencia de los niveles de impacto en las pérdidas

Nivel de impacto	Frecuencia	Porcentaje
Bajo	5	50,00 %
Medio	4	40,00 %
Alto	1	10,00 %

Total	**10**	**100,00 %**

De los diez eventos registrados, cinco son de impacto bajo, cuatro de impacto medio y uno de impacto alto (Tabla 17); solo este último requiere inversión en infraestructura o equipamiento, de modo que nueve pueden corregirse ajustando la práctica existente. La observación coincide además con el contraste del apartado 7.1: 16 de los 21 productores no reportan pérdidas en el transporte, aunque los transportistas estiman un daño del 2,1 % en promedio (entre 1 % y 3 %) que asume el productor, es decir, quien paga la merma no la percibe. En síntesis, los productores declaran una pérdida poscosecha total con mediana del 10 %; el 2,1 % del transporte funciona como contraste por etapa y puede estar contenido en ese total, mientras el 5,6 % de destino es un descuento económico que puede valorar el mismo daño. Por ello, las tres cifras se analizan por separado y no se agregan.

7.3. Análisis de costos

El análisis de costos cuantifica lo que le cuesta al productor sostener el cultivo y despachar su piña. La unidad de análisis es una hectárea de piña variedad MD2 durante un ciclo productivo completo.

Las fuentes se distinguen de la siguiente manera. El listado de materiales e insumos se toma del manual técnico de Ríos Rojas et al. (2019), publicado por Agrosavia, que constituye la referencia técnica para el cultivo de MD2 en Colombia. Los precios corresponden a 2025 y son reportados por uno de los productores entrevistados. El valor del jornal proviene igualmente de lo declarado por los productores para ese mismo año. Las cantidades no se toman del manual: este corresponde a la producción de semilla y trabaja con una densidad de 65.000 plantas por hectárea de vivero, mientras que aquí se adopta la densidad de 50.000 plantas del productor tomado como referencia, destinada a la producción de fruta. Esa densidad supera la mediana de 38.000 plantas reportada por el conjunto de los entrevistados, de modo que la

estructura de costos corresponde a un predio con mayor intensidad de siembra y no al promedio de la muestra.

7.3.1. Costos de materiales y suministros

Los costos de materiales y suministros ascienden a $45.459.000 por hectárea y ciclo (Tabla 18).

Tabla 18.
Costos de materiales y suministros para una hectárea de piña variedad MD2

Categoría	Materiales / Equipos	Cantidad / Características	Costo (COP)	Costo unitario (COP)
Materiales y suministros	Semillas (colinos) de piña MD2	50.000 unidades	3.500.000	70
	Canastillas	200 (20-30 kg)	7.000.000	35.000
	Baldes 20 L	3 unidades	45.000	15.000
	Tanques	3 unidades de 55 galones	270.000	90.000
	Tazas plásticas	3 unidades	9.000	3.000
	Herbicidas y coadyuvantes	Para control de arvenses	3.000.000	—
	Fertilizantes	Mezcla NPK + microelementos	20.900.000	—
	Fungicidas	Para control fitosanitario	2.000.000	—
Maquinaria y equipos	Barra	4 unidades	50.000	12.500
	Machete	4 unidades	25.000	6.250
	Herramientas manuales	Azadones, barras	1.280.000	320.000
	EPP	4 sets	420.000	105.000
	Fumigadora de espalda	2 unidades	700.000	350.000
	Motor de fumigación	1 unidad	1.300.000	1.300.000
	Tractor	12 horas	960.000	80.000/h
Infraestructura	Bodega de almacenamiento	20 m²	4.000.000	
Costo total			45.459.000	

Los fertilizantes concentran el 46 % del costo de materiales, lo que sitúa el mayor rubro de la estructura de costos en la fase agronómica del ciclo.

7.3.2. Costos de mano de obra

El cultivo lo trabajan cuatro personas de forma permanente, que son las mismas que realizan la cosecha. El costo de mano de obra asciende a $6.600.000 por hectárea y ciclo, equivalentes a 110 jornales (Tabla 19).

Tabla 19.
Costos de mano de obra por hectárea y ciclo productivo

Concepto	Valor	Fuente
Personas que trabajan el cultivo	4	Entrevista
Área del predio de referencia	13 ha	Entrevista
Jornada semanal por persona	5,5 jornales	Entrevista
Duración del ciclo productivo	65 semanas (15 meses)	Entrevista
Jornales por ciclo en el predio	1.430	Cálculo
Jornales por hectárea y ciclo	110	Cálculo
Valor del jornal (2025)	$60.000	Entrevista
Costo de mano de obra por hectárea y ciclo	**$6.600.000**	**Cálculo**

El jornal corresponde al valor pagado en 2025. El predio de referencia tiene 13 hectáreas; en la muestra la intensidad de mano de obra varía entre 0,25 y 1,17 personas por hectárea, con mediana de 0,45.

El manual técnico de Ríos Rojas et al. (2019) señala que el cultivo de piña demanda gran cantidad de mano de obra, pero no reporta jornales por actividad. Por esa razón el rubro se construye con lo declarado en la entrevista. El único aspecto que no se puede desagregar es la distribución de los jornales entre labores.

7.3.3. Costos logísticos del productor

El productor no paga el transporte por viaje. Paga $2.000 por cada canastilla que despacha. La cantidad de canastillas que necesita depende del tamaño de la piña. En una canastilla caben 10 gruesas, 14 parejas o 16 pipos.

De los 50.000 colinos sembrados en el predio de referencia salen 45.000 piñas para vender. Con esa cantidad el flete va de $5.626.000, si toda la fruta saliera pipo, a $9.000.000, si toda saliera gruesa. Con una mezcla de 50 % gruesa, 30 % pareja y 20 % pipo asciende a $7.554.000 (Tabla 20).

Tabla 20.
Costo de transporte según el calibre de la fruta, por hectárea y ciclo

Escenario de calibre	Piñas por canastilla	Canastillas	Costo de transporte
Toda gruesa	10	4.500	$9.000.000
Toda pareja	14	3.214	$6.428.000
Toda pipo	16	2.813	$5.626.000
Mezcla 50 % gruesa, 30 % pareja, 20 % pipo	—	**3.777**	**$7.554.000**

Cálculo sobre 45.000 piñas comercializables y una tarifa declarada de $2.000 por canastilla. La participación de cada calibre es un supuesto, ya que no se dispone de una medición. Las canastillas se registran entre los materiales de la Tabla 18 y el cargue está contenido en el rubro de mano de obra, de modo que no se suman en este cálculo.

7.3.4. Costo total y costo unitario

Sumados los tres rubros, producir y despachar una hectárea cuesta $59.613.000 en un ciclo (Tabla 21). La piña se paga por peso, de modo que el costo se expresa en la misma unidad. Las 45.000 piñas comercializadas equivalen a 61.425 kilogramos y el costo resulta de $970 por

kilogramo. Los materiales representan el 76,3 % del total, el transporte el 12,7 % y la mano de obra el 11,1 %.

La conversión a peso se hace con los rangos por calibre declarados en las entrevistas, tomando el punto medio de cada uno: 1,5 kilogramos la fruta gruesa, 1,35 la pareja y 1,05 el pipo. Ponderados con la misma mezcla de calibres empleada en el cálculo del transporte, el peso promedio resultante es de 1,365 kilogramos por piña.

Tabla 21.
Estructura de costos del productor por hectárea y ciclo productivo

Rubro	Valor	Participación	Fuente
Materiales y suministros	$45.459.000	76 %	Listado del manual técnico; precios de entrevista
Transporte	$7.554.000	13 %	Entrevista
Mano de obra	$6.600.000	11 %	Entrevista
Costo total	**$59.613.000**	**100 %**	**Cálculo**

Valores para la hectárea de referencia de piña MD2 durante un ciclo de quince meses. El transporte corresponde al escenario de mezcla de calibres de la Tabla 20. El costo por kilogramo baja cuando se siembra más denso. La preparación del terreno, el riego y la mano de obra no aumentan por sembrar más plantas en la misma hectárea, de modo que se reparten entre más fruta.

7.3.5. Ingresos y margen

El precio depende del calibre y es el mismo para los 21 entrevistados: $1.600 por kilogramo de fruta gruesa, $1.300 por la pareja y $800 por el pipo. Con esos precios, los 61.425 kilogramos comercializados en el ciclo generan $85.252.500 por hectárea, volumen equivalente a 61,4 t/ha, por encima de las 45,0 t/ha registradas para Lebrija, Santander, en 2023-2024. La diferencia responde a la densidad de siembra y no a una inconsistencia con la

fuente oficial: aplicado a la mediana de 38.000 plantas de la muestra, el mismo procedimiento arroja 46,7 t/ha, prácticamente el valor reportado por el EVA, de modo que el rendimiento del predio de referencia refleja su mayor intensidad de siembra. El precio promedio ponderado por calibre asciende a $1.388 por kilogramo (Tabla 22), superior al precio de referencia de $1.300 adoptado en la evaluación ex ante, que corresponde al calibre pareja.

Tabla 22.
Ingresos por calibre, por hectárea y ciclo productivo

Calibre	Piñas	Kilogramos	Precio por kilogramo	Ingreso
Gruesa	22.500	33.750	$1.600	$54.000.000
Pareja	13.500	18.225	$1.300	$23.692.500
Pipo	9.000	9.450	$800	$7.560.000
Total	**45.000**	**61.425**	**$1.388**	**$85.252.500**

Precios declarados por los 21 productores entrevistados. El reparto por calibre corresponde al escenario de la Tabla 20 y los pesos al punto medio de los rangos declarados. El precio total es el promedio ponderado por peso.

Frente a un costo de $970 por kilogramo, el margen es de $418 por kilogramo, equivalente al 30 % de los ingresos. El calibre define el resultado por partida doble. La fruta gruesa exige más canastillas y encarece el flete, pero se paga al doble que el pipo. Por eso, el margen del productor depende más de la proporción de fruta gruesa que del costo del transporte.

7.4. Síntesis del diagnóstico: puntos críticos del sistema logístico

Este apartado reúne los resultados de los cuatro instrumentos del diagnóstico: las entrevistas, la lista de chequeo, la guía de observación de pérdidas y el análisis de costos. Al contrastarlos, los tres vacíos de coordinación identificados en las entrevistas (apartado 7.1) se precisan en cinco puntos críticos. La lista de chequeo marca la orientación general: con un 52,9 % de cumplimiento, las etapas agrícolas están cubiertas y los incumplimientos se concentran

en poscosecha, trazabilidad y coordinación. El problema principal está, por tanto, en la forma de organizar el despacho y la información, más que en la capacidad de producir.

- Punto crítico 1. Coordinación entre actores. Ningún productor está asociado y cada finca despacha por separado, en promedio 3,7 veces por semana, lo que suma 77 despachos semanales entre los 21 productores. Los acuerdos con el transportista y el comerciante se hacen por llamada o mensaje, sin confirmar horarios ni cupos, aunque el comerciante hace el pedido con 7,9 días de anticipación. Esa anticipación no se aprovecha para programar: el despacho se compromete antes de conocer el estado de la carga, y las esperas y los viajes incompletos apuntan a un problema de sincronización más que de falta de vehículos.
- Punto crítico 2. Registro y trazabilidad. Los productores anotan en cuaderno, ningún transportista usa herramientas de gestión y ningún documento cruza las canastillas despachadas con las pagadas. La lista de chequeo confirma este vacío en las etapas de poscosecha. Como consecuencia, no puede establecerse en qué eslabón se pierde la fruta: 13 de los 15 transportistas sitúan el daño en el cargue y el descargue, pero de ese paso no queda constancia.
- Punto crítico 3. Aprovechamiento de la capacidad de transporte. Cada productor contrata por su cuenta despachos de unas 2,5 t en vehículos de 5 t, es decir, con cerca de la mitad de la capacidad disponible. Al despachar en solitario, el productor no reúne volumen para negociar la tarifa, y el flete llega a $7.554.000 por hectárea y ciclo, según el cálculo de la Tabla 20; su participación corresponde al 12,7 % del costo total presentado en la Tabla 21.
- Punto crítico 4. Medición de la calidad. El punto de corte se decide a simple vista y la pérdida poscosecha total declarada tiene una mediana del 10 %, con casos entre el 5 % y el 15 %. La carga no se verifica al entregarla ni al recibirla; los transportistas reportan una merma promedio del 2,1 % y, en destino, los comerciantes descuentan en promedio el 5,6 % del valor por inspección visual, sin que el productor tenga cómo controvertirlo. Estas

cifras no son aditivas: la merma en transporte puede formar parte de la pérdida total y el descuento puede corresponder al mismo deterioro físico. Sin un criterio de calidad acordado, el costo del deterioro termina en el productor.

- Punto crítico 5. Información económica. Los productores no registran sus costos por rubro y 13 de los 15 transportistas no conocen su costo mensual de operación. Ningún actor lleva las cuentas que permitirían conocer el costo de $970 por kilogramo y el margen de $418 por kilogramo calculados en el apartado 7.3, de modo que nadie sabe qué rubro pesa más ni si una decisión de despacho conviene.

Los cinco puntos no tienen el mismo peso. La pérdida poscosecha total declarada, valorada en $8.475.540 por hectárea y ciclo como ingreso no percibido, supera lo que se paga por flete ($7.554.000; Tabla 20), de modo que el modelo no puede concentrarse solo en el transporte. Los tres primeros dependen de cómo se organice la coordinación y definen los criterios con que se comparan los esquemas en el Capítulo 8; el cuarto y el quinto se atienden con las herramientas, las reglas y el sistema de indicadores del modelo (Tablas 29 a 31), cualquiera sea el esquema. El precio de venta, que los productores ponen en primer lugar, responde a la asimetría frente al intermediario y queda fuera de estos puntos críticos, porque no se resuelve con coordinación logística.

8. Evaluación y selección de los esquemas de coordinación y de las tecnologías accesibles

Este capítulo responde al objetivo específico 3. Como tres de los puntos críticos del diagnóstico (coordinación entre actores, registro y trazabilidad y aprovechamiento del transporte) dependen de cómo se organice la coordinación, aquí se resuelven dos decisiones, cada una con su propia matriz multicriterio y con el criterio común de la viabilidad de implementación para los productores. La primera es qué esquema adoptar, entre tres: el descentralizado, que es el actual; el colaborativo, con consolidación de carga entre productores

cercanos; y el centralizado en un nodo de acopio veredal; se desarrolla en los apartados 8.1 a 8.3. La segunda es con qué tecnologías sostenerlo, para lo cual se jerarquizan nueve alternativas identificadas en la literatura para reportar disponibilidad, consolidar pedidos y registrar los despachos; se desarrolla en los apartados 8.4 y 8.5. En el apartado 8.1, cada esquema se describe con la misma estructura: primero sus flujos de información, físico y de decisiones; luego su ventaja y sus limitaciones, y al final su relación con la operación actual de la cadena.

8.1. Descripción de los esquemas de coordinación y su relación con los modelos

Los apartados 8.1 a 8.3 resuelven la primera decisión del capítulo: en el 8.1 se describen los esquemas, en el 8.2 se evalúan con la matriz multicriterio y en el 8.3 se selecciona el esquema. Los tres esquemas corresponden a los mecanismos de coordinación de red que distingue Kmiecik (2022): de mercado (descentralizado), social (colaborativo) y jerárquica (nodo de acopio). Cada uno se describe con la misma estructura: primero sus flujos de información, físico y de decisiones; luego su ventaja y sus limitaciones, y al final su relación con la operación actual de la cadena.

8.1.1. Esquema 1: coordinación descentralizada o individual

Este esquema consiste en que cada productor organiza por su cuenta el despacho de su carga, sin acuerdos con los demás productores. El flujo de información se da por llamada o mensaje entre cada productor y su transportista, sin que quede constancia de lo acordado ni conocimiento de lo que están despachando los demás productores de la zona. El flujo físico consiste en despachos individuales, con el vehículo saliendo con el volumen que cada finca tenga disponible. El flujo de decisiones queda en cada productor, que define por su cuenta cuándo cosechar, cuándo despachar y con quién negociar el flete.

Su ventaja es que no exige acuerdos con otros productores ni inversión, y conserva la autonomía de cada uno. Tiene dos limitaciones: la falta de capacidad de negociación, porque

el productor paga $2.000 por canastilla (20 de los 21 entrevistados), una tarifa que enfrenta solo y sin volumen para discutirla; y el uso del vehículo, porque los transportistas fijan su tarifa de referencia sobre una base de cinco toneladas, pero cada productor despacha en promedio unas 2,5 t, y esa holgura es la que la consolidación permitiría aprovechar.

Es el esquema que siguen hoy los 21 productores entrevistados: ninguno está asociado y cada finca despacha por separado, en promedio 3,7 veces por semana, lo que suma 77 despachos semanales. Por ser el único con datos de campo, se toma como línea base de la comparación.

8.1.2. Esquema 2: coordinación colaborativa mediante consolidación de carga en ruta multipunto

Este esquema, conocido como ruta lechera o milk run, consiste en que un solo vehículo recorre varios puntos siguiendo una ruta planificada y consolida en un mismo viaje volúmenes inferiores a su capacidad; la literatura de primera milla lo aborda mediante modelos de ruteo con restricciones de capacidad y ventana de tiempo (Han et al., 2026). El flujo de información deja de ser bilateral: los productores de una zona reportan su disponibilidad a un líder veredal, que consolida los pedidos y acuerda con el transportista la ruta y el horario. El flujo físico agrupa la carga de varias fincas en un vehículo de cinco toneladas, que es la base tarifaria de los transportistas y el límite acordado para las vías rurales. En el flujo de decisiones, cada productor conserva la decisión de cosechar, pero el despacho se programa de forma conjunta.

Su ventaja es que agrupa volumen sin inversión: con despachos de unas 2,5 t, dos productores completan el vehículo, aseguran la carga completa y ganan una posición conjunta para negociar la tarifa por canastilla. Además, puede iniciarse sin una figura asociativa formal y con herramientas digitales de uso corriente. Tiene tres limitaciones: depende de acuerdos sostenidos entre vecinos y de que el líder veredal consolide los pedidos; alarga el tiempo entre

el corte y la entrega para los primeros de la ruta, en una fruta con vida útil de hasta tres días y con 11 de los 15 transportistas que ya esperan turno para descargar; y, al mezclar la carga de varias fincas, dificulta atribuir el daño a un origen, en una cadena donde la carga no se verifica y la pérdida la asume el productor.

La práctica ya existe de manera informal: dos de los quince transportistas declaran recoger en varias fincas, hasta en tres parcelas, antes de ir a la Central de Abastos, aunque la agrupación la deciden ellos, sin acuerdo entre productores ni reparto pactado del flete. Esto no demuestra la viabilidad del esquema, pero indica una práctica compatible con él. Lo que el esquema cambia es quién organiza la ruta y con qué reglas: una coordinación previa entre productores para planificarla, comprometer volúmenes y repartir el costo.

8.1.3. Esquema 3: coordinación centralizada en un nodo de acopio veredal o zonal

Este esquema añade un nodo físico de consolidación donde convergen las entregas de los productores antes del despacho. El flujo de información se concentra en quien administra el nodo, que recibe los reportes de los productores y define el orden de recepción. El flujo físico ocurre en dos tramos: cada productor lleva su carga al nodo por medios propios (moto, tractor o animal de carga) y desde allí un vehículo despacha de forma consolidada a la Central de Abastos; solo podría ser de mayor capacidad donde la vía lo permita, dado el límite de cinco toneladas acordado para las vías rurales. En el flujo de decisiones, el administrador del nodo fija los criterios de calidad y la programación del despacho, y cada productor conserva la decisión de cosechar.

Su ventaja es que mueve volúmenes mayores con menos viajes y habilita un punto de pesaje y registro antes del despacho, con lo que atiende también el punto crítico de medición de la calidad. Tiene cuatro limitaciones: exige adecuar un espacio ventilado, techado y con acceso vehicular, con un costo mínimo de $4.000.000 por una bodega de 20 m² (Tabla 18);

añade al productor un tramo hasta el nodo, con su tiempo, manipulación y costo, que reduce el ahorro de la consolidación; como los 21 productores despachan al corte, el nodo sería de tránsito y no de almacenamiento; y requiere una figura que lo administre, con reglas aceptadas sobre recepción y calidad.

En la cadena estudiada no hay hoy condiciones para este esquema: ninguno de los 21 productores está asociado, cada uno despacha al corte desde su finca y no existe una organización que pueda administrar el nodo. A diferencia de la ruta multipunto, que ya se practica de manera informal, el nodo tendría que crearse desde cero.

8.2. Evaluación multicriterio de los esquemas de coordinación

Los tres esquemas se evalúan con los mismos criterios, con el descentralizado como línea base. Tres criterios provienen de los puntos críticos del diagnóstico: si el esquema establece un acuerdo previo entre productores, transportistas y comerciantes (coordinación); si agrupa carga hasta acercarse a la base del vehículo y mejora la posición de negociación (capacidad de transporte); y si permite dejar constancia del despacho y atribuir el daño a un origen (registro y trazabilidad). El cuarto responde al contexto y mide el esfuerzo que el esquema exige frente a la operación actual, decisivo porque no hay asociatividad formal y se despacha al corte. Los puntos críticos de medición de la calidad y de información económica no son criterios de evaluación porque se atienden con las herramientas y reglas del modelo, cualquiera sea el esquema, aunque el nodo facilitaría un punto de pesaje.

La evaluación se hace mediante una matriz multicriterio ponderada, con el mismo procedimiento que se aplica a las tecnologías en el apartado 8.5. Cada esquema se califica en escala de 1 (no atiende el punto crítico) a 5 (lo atiende sin requisitos adicionales), y su puntuación es la suma de cada calificación multiplicada por la ponderación del criterio (Ecuación 3). Las ponderaciones se asignan a partir del diagnóstico. La coordinación entre

actores y el esfuerzo de implementación reciben el 30 % cada uno: la descoordinación es el problema principal de la cadena (apartado 7.4) y, sin asociatividad y con despacho al corte, un esquema difícil de implementar no se sostiene. La capacidad de transporte recibe el 25 %, porque el esquema define directamente si se consolida la carga. La trazabilidad recibe el 15 %, porque también la atienden las herramientas y la regla R4 cualquiera sea el esquema; es el mismo peso que tiene en la matriz de tecnologías (Tabla 23). Los tres esquemas se califican en los cuatro criterios; la línea base recibe 5 en esfuerzo de implementación, porque es la operación vigente y no exige cambios. No se usan cifras de costo, viajes ni emisiones, porque solo existen para el esquema actual; cada celda indica si la calificación proviene de un dato observado o de una estimación, y el impacto ambiental se estima aparte para el esquema seleccionado.

Tabla 23.
Matriz de evaluación multicriterio de los esquemas logísticos aplicables

Criterio	Ponderación	Esquema 1: descentralizado (línea base)	Esquema 2: colaborativo en ruta multipunto	Esquema 3: nodo de acopio
Coordinación entre actores	30 %	1. Cada productor acuerda por separado con su transportista, sin conocer lo que despachan los demás (observado)	4. Exige acuerdo previo entre vecinos y una figura que consolide pedidos, sin requerir asociación formal (estimado)	3. Concentra la coordinación en quien administra el nodo, lo que exige reglas aceptadas por todos (estimado)
Aprovechamiento de la capacidad de transporte	25 %	1. Despachos del orden de 2,5 t sobre una base tarifaria de 5 t, sin volumen para negociar (observado)	4. Dos productores con volumen semejante completan la base tarifaria del vehículo (estimado)	4. Permite reunir volumen de varias fincas, condicionado al acceso vial del nodo (estimado)
Trazabilidad de la operación	15 %	2. Registro en cuaderno, sin documento que cruce canastillas despachadas contra pagadas (observado)	2. La carga de varias fincas viaja junta sin punto de verificación, por lo que el daño no queda atribuible (estimado)	4. El paso por el nodo habilita pesaje y registro por finca antes del despacho (estimado)
Esfuerzo de implementación	30 %	5. Es la operación vigente y no exige cambios (observado)	4. No requiere inversión ni figura asociativa formal;	1. Exige adecuar un espacio desde $4.000.000, un

respecto de la línea base			exige sostener acuerdos de horario y volumen (estimado)	traslado adicional a cargo del productor y una figura que administre el nodo (estimado)
Puntuación ponderada	100 %	**2,35**	**3,70**	**2,80**

La línea base obtiene la puntuación más baja (2,35): solo destaca en esfuerzo de implementación, porque es la operación vigente, y no atiende ninguno de los puntos críticos identificados. Los dos esquemas propuestos la superan, pero ninguno domina en todos los criterios.

El esquema colaborativo mejora la coordinación y el aprovechamiento del transporte, aunque no la trazabilidad: al viajar junta la carga de varias fincas sin punto de verificación, el daño deja de ser atribuible a un origen, de modo que en ese criterio iguala a la línea base. El esquema con nodo de acopio es el único que la atiende, porque el paso por el nodo permite pesar y registrar por finca antes del despacho, y alcanza la misma calificación en aprovechamiento del transporte; su desventaja se concentra en el esfuerzo de implementación.

8.3. Selección del esquema de coordinación

Con puntuaciones ponderadas de 3,70 y 2,80 sobre 5 (Tabla 23), el esquema colaborativo supera al nodo de acopio, y la diferencia se explica sobre todo por el esfuerzo de implementación. El orden se mantiene si los cuatro criterios pesan lo mismo (3,50 frente a 3,00), de modo que la selección no depende de las ponderaciones elegidas. Se selecciona el colaborativo por dos razones. La primera es que puede iniciarse sin inversión ni figura asociativa formal, condición decisiva porque no hay asociatividad y los 21 productores despachan al corte, mientras el nodo exige adecuar un espacio, un tramo de traslado adicional y una figura que lo administre. La segunda es que obtiene la mayor calificación en coordinación entre actores y empata con el nodo en aprovechamiento de la capacidad de transporte; el nodo solo lo supera en trazabilidad.

El nodo de acopio se conserva como opción de mediano plazo. Kmiecik (2022) concluye que el esquema más eficiente es la coordinación centralizada con un nodo responsable de los procesos logísticos, por lo que sería la evolución pertinente una vez que la coordinación se sostenga y haya recursos para la infraestructura. Entre tanto, el punto crítico de trazabilidad se atiende con las herramientas del apartado 8.4: en origen, la plantilla compartida (C-01) registra las canastillas de cada productor y el refractómetro (A-01) la calidad por lote; en destino, el cierre del despacho registra lo entregado, lo aceptado y la novedad, y atribuye el rechazo al lote de origen (regla R4). Comparar ambos registros permite ubicar la pérdida y su origen sin la infraestructura del nodo.

8.4. Evaluación e identificación de tecnologías accesibles

Los apartados 8.4 y 8.5 resuelven la segunda decisión del capítulo: en el 8.4 se identifican las alternativas tecnológicas por nivel y en el 8.5 se evalúan con la matriz multicriterio. El esquema seleccionado requiere herramientas para reportar la disponibilidad de fruta, consolidar los pedidos y dejar constancia de cada despacho. Las alternativas parten de una base digital nula: los productores registran en cuaderno, ninguno cuenta con trazabilidad formal y ningún transportista usa herramientas de gestión. Además, según el experto consultado, la señal de celular e internet es regular y varía según la zona, condición que cualquier herramienta debe admitir. Se evalúan nueve alternativas identificadas en la revisión de literatura, organizadas en tres niveles (captura de información, registro y trazabilidad, y coordinación logística), mediante la matriz multicriterio del apartado 8.5.

8.4.1. Nivel I: captura de información

Reúne las herramientas para medir en campo lo que hoy se decide a simple vista, según el enfoque de agricultura de precisión, que basa las decisiones en mediciones verificables (Lubag et al., 2023). Atiende el punto crítico de medición de la calidad, porque sin un dato

objetivo de madurez o peso el productor no puede sustentar el estado de la fruta ante el comprador. Se evalúan el refractómetro digital con aplicación de registro, la balanza digital conectada y los sensores IoT con plataforma de monitoreo.

8.4.2. Nivel II: registro y trazabilidad de información

Reúne las soluciones para registrar el despacho y seguir el producto hasta el comprador, lo que permite identificar los factores que afectan la cosecha en cantidad o inocuidad. Atiende el punto crítico de registro y trazabilidad, porque sin cruzar lo despachado con lo pagado el daño no se puede atribuir a un origen y la pérdida recae siempre en el productor. Se evalúan las etiquetas con código QR estático, las etiquetas físicas codificadas con registro manual y la trazabilidad con blockchain básico.

8.4.3. Nivel III: coordinación logística

Reúne las soluciones para que productores, transportistas y comerciantes acuerden con anticipación qué se despacha, cuándo y en qué vehículo, lo que reduce esperas, errores en los pedidos y viajes con capacidad subutilizada. Atiende el punto crítico de coordinación entre actores en sus dos expresiones: la falta de un canal de comunicación común y la programación de despachos sin información previa de disponibilidad ni demanda. Se evalúan WhatsApp Business con Google Sheets, los formularios digitales con base de datos compartida y una plataforma web de coordinación logística. La Tabla 24 reúne las nueve alternativas evaluadas en los tres niveles.

Tabla 24.
Alternativas tecnológicas evaluadas para la cadena productiva de piña en Lebrija, Santander

Código	Tecnología	Función principal en la cadena	Inversión estimada	Viabilidad y prioridad
A-01	Refractómetro digital con aplicación de registro	Mide los °Brix para apoyar la definición del punto de cosecha y registrar la calidad por	$150.000–$300.000; aplicación gratuita	Alta; cuarta en la matriz (Tabla 26)

Código	Tecnología	Función principal en la cadena	Inversión estimada	Viabilidad y prioridad
		lote; permite aplicar un criterio objetivo basado en sólidos solubles (Ding y Syazwani, 2016; FAO, 1993).		
A-02	Balanza digital conectada	Trazabilidad cuantitativa: registra el volumen despachado por finca y evita disputas sobre cantidades.	$120.000–$800.000	Media: aporte limitado a la coordinación
A-03	Sensores IoT con plataforma de monitoreo	Monitoreo de temperatura, humedad y ubicación en tiempo real.	$3.700.000–$9.200.000 (10 sensores)	Baja, no recomendada: exige conectividad 4G/5G constante
B-01	Etiquetas con códigos QR estáticos	Vinculan lote, finca, fecha y °Brix a una base en Google Sheets, legible desde cualquier smartphone.	$580.000–$650.000 (1.000 etiquetas)	Baja: el papel plastificado contradice el objetivo de sostenibilidad
B-02	Etiquetas físicas codificadas con registro manual	Código alfanumérico y talonario en finca; opera sin conectividad ni smartphone.	$100.000–$300.000	Baja: aporte mínimo a la coordinación; posible uso de transición donde no haya smartphone
B-03	Trazabilidad con blockchain básico	Registro inmutable de transacciones (IBM Food Trust, OriginTrail).	$5.000.000–$12.000.000	Baja, no recomendada: alta complejidad técnica
C-01	WhatsApp Business y Google Sheets	Centraliza pedidos, programación de viajes y consolidación de rutas; habilita compartir vehículo entre dos productores.	$0–$500.000	Muy alta viabilidad. Solución básica de coordinación, punto de entrada del modelo.
C-02	Formularios digitales con base de datos compartida	Captura la disponibilidad y la demanda en campos fijos, sin depender de transcribir conversaciones, y las consolida en una base que los tres actores consultan.	$300.000–$1.000.000	Alta viabilidad. Solución de estructuración de la información, opera sin conexión permanente.
C-03	Plataforma web de coordinación logística	Prototipo de plataforma web que integraría módulos para el registro y la gestión de productores, comerciantes, transportistas y líderes veredales; el reporte de disponibilidad de producto y demanda; la	$3.000.000–$5.000.000	Media-alta viabilidad. Solución integral de coordinación logística y horizonte de consolidación del modelo; su adopción se prevé

Código	Tecnología	Función principal en la cadena	Inversión estimada	Viabilidad y prioridad
		solicitud y asignación de vehículos; la consolidación de cargas y programación de rutas; la confirmación y el cierre de los despachos; y la consulta del historial, novedades e indicadores básicos de operación. El sistema debería manejar permisos según el tipo de usuario, emitir alertas de confirmación o cancelación y permitir el registro desde dispositivos móviles, con formularios sencillos y de bajo consumo de datos debido a la conectividad intermitente de algunas veredas. Esta propuesta corresponde a un prototipo funcional y no a una plataforma desplegada ni validada en operación real.		una vez sostenida la coordinación con C-01 y C-02.

8.5. Matriz de evaluación multicriterio

8.5.1. Criterios y ponderaciones

La jerarquización se realiza mediante seis criterios ponderados (Tabla 25), cuyos pesos se definen a partir de los hallazgos del diagnóstico y del esquema seleccionado en el apartado anterior. El mayor peso (20 % cada uno) lo comparten tres criterios: el aporte a la coordinación entre actores, que recoge la función central del esquema colaborativo; la facilidad de adopción, que opera como condición de uso efectivo, dado que el 72 % de los productores presenta bajo nivel de escolaridad (IGAC, 2022) y el 100 % registra en cuaderno; y la accesibilidad económica, que refleja la limitación de recursos establecida en el análisis de costos. La viabilidad técnica (15 %) responde a la señal de celular e internet, regular y variable según la vereda. La trazabilidad (15 %) conserva un peso relevante como punto crítico del diagnóstico, aunque inferior al de los criterios anteriores porque el apartado 8.2 establece que el esquema

colaborativo no la mejora y su atención corresponde a las herramientas del Nivel II; la sostenibilidad ambiental y social (10 %) discrimina entre alternativas por el impacto de los materiales empleados. Cada criterio se valora en una escala de 1 a 5 con descriptores por nivel, y la puntuación ponderada se calcula aplicando la Ecuación 3.

Tabla 25.
Criterios y ponderaciones de la matriz de evaluación multicriterio

Criterio	Ponderación	Justificación
Aporte a la coordinación entre actores (Coord)	20 %	Función que el esquema colaborativo requiere habilitar; atiende los dos puntos críticos de mayor incidencia económica del diagnóstico.
Trazabilidad (Tr)	15 %	Punto crítico del diagnóstico, atendido por las herramientas del Nivel II y no por el esquema seleccionado (apartado 8.2).
Sostenibilidad ambiental y social (S)	10 %	Discrimina entre alternativas por el impacto ambiental de los materiales empleados.
Viabilidad técnica (Vtec)	15 %	Señal de celular e internet regular y variable según la vereda, según el experto consultado.
Accesibilidad económica (AE)	20 %	Limitación de recursos establecida en el análisis de costos del productor.
Facilidad de adopción / curva de aprendizaje (FAdop)	20 %	Condición de uso efectivo: el 72 % de los productores presenta bajo nivel de escolaridad (IGAC, 2022) y el 100 % registra en cuaderno.
Total	100 %	

Ecuación 3. Puntuación ponderada en la matriz multicriterio

$$\text{Puntuación total} = \sum_{i=1}^{n} (P_i \times W_i)$$

Donde:

$P_i =$ puntaje asignado al criterio $*i*$ (escala $1-5$)

$W_i =$ peso ponderado del criterio $*i*$ (expresado en decimales)

$n =$ número de criterios evaluados (6)

8.5.2. Resultados de la evaluación

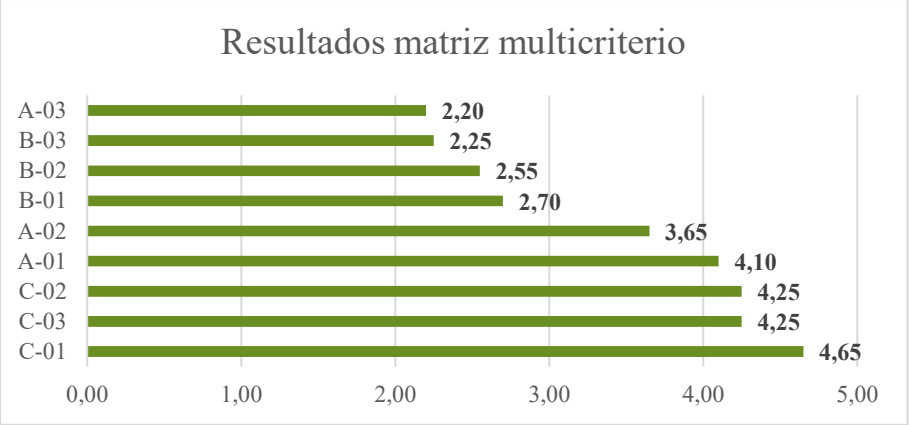
La Tabla 26 presenta los resultados consolidados de la matriz multicriterio para las nueve alternativas evaluadas, ordenadas de mayor a menor puntuación total.

Tabla 26.
Evaluación consolidada de alternativas tecnológicas

Código	Coordinación (20 %)	Accesibilidad económica (20 %)	Facilidad de adopción (20 %)	Trazabilidad (15 %)	Viabilidad técnica (15 %)	Sostenibilidad (10 %)	Total	Prioridad
C-01	5	5	4	5	4	5	4,65	Alta
C-03	5	4	3	5	4	5	4,25	Alta
C-02	4	5	3	4	5	5	4,25	Alta
A-01	2	5	5	5	3	5	4,10	Alta
A-02	2	4	4	4	5	3	3,65	Media
B-01	1	4	2	5	3	1	2,70	Baja
B-02	2	3	2	4	3	1	2,55	Baja
B-03	1	1	2	5	2	4	2,25	Baja
A-03	1	1	1	5	3	4	2,20	Baja

Las cuatro alternativas de mayor prioridad son C-01 (4,65), C-02 y C-03 (4,25 cada una) y A-01 (4,10), todas por encima de 4,00 y seguidas por A-02 (3,65), única alternativa de prioridad media (Tabla 26, Figura 1). Las tres primeras son del Nivel III, lo que es consistente con que la coordinación esté entre los criterios de mayor peso y con la función de programación conjunta que requiere el esquema seleccionado. C-01 encabeza el orden porque combina el máximo aporte a la coordinación con costo nulo y adopción sencilla. C-02 y C-03 empatan con una curva de aprendizaje más exigente: C-02 tiene a favor que opera sin conexión permanente, y C-03, un mayor aporte a la coordinación, aunque depende de la señal de cada vereda. A-01 queda cuarta: tiene la máxima valoración en facilidad de adopción y accesibilidad económica, pero actúa sobre la calidad en origen y no sobre la programación de los despachos.

Figura 1.
Resultados matriz multicriterio



En el extremo opuesto, B-03 (blockchain) y A-03 (sensores IoT) obtienen las menores puntuaciones por su costo, su complejidad técnica y la infraestructura que exigen, ausente en el contexto rural; B-01 (etiquetas QR) queda en prioridad baja por su aporte mínimo a la coordinación y el impacto ambiental del papel plastificado. En consecuencia, ninguna alternativa del Nivel II alcanza la prioridad alta, y el punto crítico de registro y trazabilidad no se atiende con una herramienta específica, sino con la combinación de las alternativas priorizadas: la hoja compartida registra las canastillas y el volumen de cada productor, el refractómetro digital (A-01) registra la calidad por lote en origen y el cierre del despacho (regla R4) registra en destino lo entregado, lo aceptado y las novedades. Al cruzar ambos registros se puede ubicar la pérdida y su origen sin etiquetas ni infraestructura adicionales.

Las cuatro alternativas de prioridad alta (C-01, C-02, C-03 y A-01) conforman el sistema tecnológico del modelo; a su favor, más del 90 % de los entrevistados manifiesta disposición a adoptar herramientas accesibles. El capítulo siguiente especifica cómo se integran con el esquema de distribución adoptado.

9. Estructura y especificación del modelo

El modelo de coordinación logística es el conjunto de actores, recursos, herramientas y reglas con el que los despachos de piña de Lebrija, Santander, hacia la Central de Abastos de Bucaramanga dejan de hacerse de forma individual y pasan a programarse y consolidarse de

forma conjunta. Se basa en los tres mecanismos del cuarto objetivo específico: la consolidación de carga, que agrupa en un vehículo el producto de varias fincas; el intercambio de información, que pone en común la disponibilidad en finca y la demanda del comprador; y la programación conjunta de despachos, que fija con anticipación qué se envía, cuándo y en qué vehículo. Según la tipología de Kmiecik (2022), es un mecanismo de coordinación social, porque la articulación se resuelve por acuerdo entre pares y no por una autoridad central. Comprende cuatro actores (productor, líder veredal, transportista y comerciante mayorista), la recolección multipunto seleccionada en el Capítulo 8, en vehículo de cinco toneladas y con dos productores por ruta como referencia, cinco herramientas de información y seis reglas de operación. Va desde el reporte de disponibilidad en finca hasta el registro de cierre en destino, sin incluir el aprovisionamiento de insumos ni las labores agrícolas.

El modelo se especifica en cuatro conjuntos: los elementos (actores, recursos y herramientas; Tabla 27), las relaciones entre ellos (flujos de información, producto y decisiones; Tabla 28), las reglas de operación y los indicadores de desempeño económico, operativo, ambiental y social. Su funcionamiento se organiza en tres componentes interrelacionados, flujo de información, flujo físico y flujo de decisiones, cuya arquitectura representa la Figura 2. El diseño resuelve las decisiones tácticas (tecnologías, rutas por vereda y estándares de calidad) y operativas (programación semanal de despachos, consolidación diaria de pedidos y verificación de grados Brix); la conformación de una figura asociativa es una decisión estratégica que el modelo no resuelve y que se plantea para una fase posterior de consolidación.

Tabla 27.
Especificación de los elementos del modelo de coordinación logística propuesto

Tipo	Elemento	Función en el modelo
Actor	Productor	Mide la madurez, reporta disponibilidad, acondiciona y entrega el producto

Tipo	Elemento	Función en el modelo
Actor	Líder veredal	Consolida los reportes, conforma la ruta y coordina con el transportista
Actor	Transportista	Ejecuta la recolección multipunto y la entrega en destino
Actor	Comerciante mayorista	Recibe el producto, verifica calidad y registra novedades
Recurso	Vehículo de carga de 5 t	Capacidad compartida entre los productores de una misma ruta
Recurso	Canastilla plástica ventilada (10 a 16 piñas, 15 a 19 kg según calibre)	Estándar de empaque y unidad de conteo
Herramienta	Refractómetro digital	Medición objetiva de grados Brix en finca
Herramienta	WhatsApp Business	Canal de reporte de disponibilidad y coordinación
Herramienta	Hoja de cálculo compartida	Registro de despachos, trazabilidad y consolidación de pedidos
Herramienta	Formularios digitales con base compartida	Captura estructurada de disponibilidad y demanda en campos fijos
Herramienta	Plataforma web de coordinación	Consolidación del histórico de despachos, consultable por los tres actores (prototipo)

Tabla 28.
Relaciones entre los elementos del modelo

Flujo	Origen y destino	Contenido	Momento	Medio
Información	Productor a líder veredal	Volumen disponible, grados Brix, fecha estimada de cosecha	Antes de las 18:00 del día previo	WhatsApp Business o formulario digital
Información	Líder veredal a transportista	Ruta conformada, puntos de recolección, horario	Noche previa al despacho	WhatsApp Business
Información	Líder veredal a comerciante	Volumen y calidad estimados por productor	Noche previa al despacho	Hoja de cálculo compartida
Físico	Productor a vehículo	Producto acondicionado en canastilla estandarizada	Recolección multipunto en la mañana	Entrega física en el punto de recolección
Físico	Vehículo a Central de Abastos	Carga consolidada de la ruta	Mismo día	Vehículo de la ruta consolidada
Información	Comerciante a líder veredal	Cantidad recibida, cantidad aceptada, novedad	Al cierre de la entrega	WhatsApp Business o formulario digital

Flujo	Origen y destino	Contenido	Momento	Medio
Decisión	Productor	Cosechar o aplazar según medición de Brix	Previo al reporte	Refractómetro digital
Decisión	Líder veredal	Conformación y secuencia de la ruta	Al consolidar los reportes	Hoja de cálculo compartida

Tabla 29.
Reglas de operación del modelo

N.º	Regla	Fundamento
R1	No se despacha producto con grado de madurez inferior a 12 °Brix; se reprograma para la ruta siguiente	Filtro objetivo de calidad que sustituye la evaluación visual y reduce la variabilidad entre productores
R2	Los productores se agrupan por cercanía geográfica hasta completar la capacidad efectiva del vehículo, con dos productores por ruta como configuración de referencia	Consolidación de carga en primera milla (Han et al., 2026)
R3	El despacho se activa por señal de disponibilidad reportada por el productor mediante WhatsApp Business o el formulario digital, y no por calendario fijo	Programación por demanda efectiva: el despacho responde a la disponibilidad real y no a un calendario predefinido
R4	El cierre del despacho se registra con la cantidad entregada, la cantidad aceptada y la novedad reportada; la novedad de calidad y el descuento aplicado se atribuyen al productor de origen identificado por su lote. El líder veredal mantiene el registro en la hoja de cálculo compartida y cada productor verifica los datos de su lote al momento del cargue. La lectura de °Brix de cada lote, tomada según la regla R1, acompaña el despacho y sirve de soporte ante el comerciante cuando este aplica un descuento por calidad	Trazabilidad del flujo inverso, punto crítico identificado en el diagnóstico, y asignación explícita de la responsabilidad sobre la información
R5	Si un productor no reporta disponibilidad o cancela, el líder veredal gestiona el reemplazo con otro productor de la zona; de no lograrlo, la ruta se ejecuta con la carga confirmada y el flete lo asumen quienes despachan. El productor ausente se reprograma en el despacho siguiente	Condición de operación de la ruta compartida: el ahorro depende de que la carga se consolide efectivamente
R6	El flete de la ruta consolidada se distribuye entre los productores en proporción al volumen despachado, medido en canastillas registradas	Equidad en la distribución del beneficio: el reparto por partes iguales no refleja el aporte diferencial de cada productor

Las seis reglas gobiernan la operación cotidiana del modelo y se limitan a las decisiones sin las cuales el esquema no puede ejecutarse: el criterio de cosecha (R1), la conformación de

la ruta (R2), la activación del despacho (R3), el registro de cierre (R4), el tratamiento de la inasistencia o cancelación (R5) y el reparto del flete (R6). Las tres últimas atienden lo que el marco de referencia señala como condición de la coordinación entre actores autónomos: quién responde por la información, qué ocurre cuando un participante falla y cómo se distribuye el beneficio. Las condiciones de carácter organizacional previas a la operación se plantean entre las recomendaciones de implementación. Estas reglas no son objeto de validación con los actores de la cadena y constituyen una propuesta a ajustar en la fase de implementación.

Tabla 30.
Sistema de indicadores de desempeño del modelo

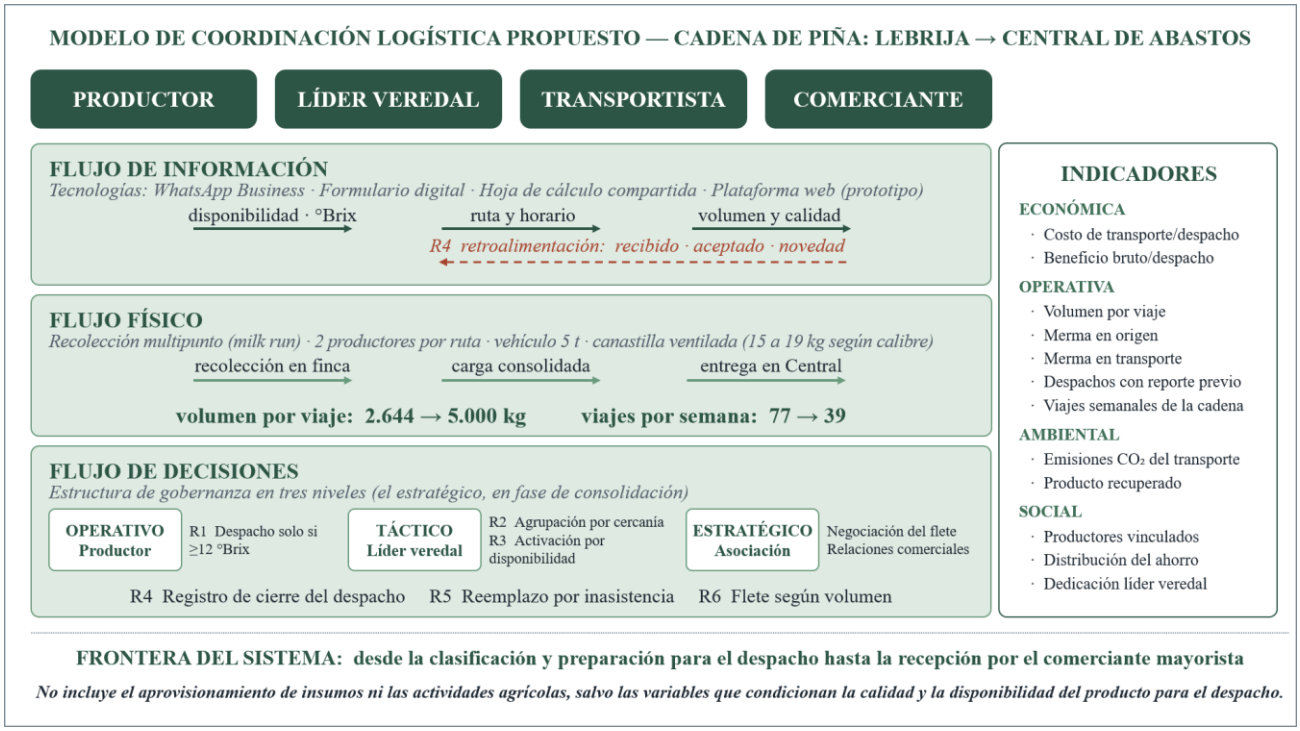
Dimensión	Indicador	Unidad	Línea base	Meta del modelo
Económica	Costo de transporte por productor por despacho (tarifa por canastilla)	COP	308.000	308.000
Económica	Ahorro por despacho	COP	—	162.500
Operativa	Volumen promedio movilizado por viaje	kg	2.355	4.318
Operativa	Pérdida poscosecha total declarada	%	10	5
Operativa	Merma en transporte (subindicador no aditivo)	%	2,1	1
Operativa	Despachos programados con reporte previo de disponibilidad	%	0	100
Operativa	Viajes semanales de la cadena	N.º	77	42
Ambiental	Emisiones de CO_2 del transporte	t/mes	34,4	19,6
Ambiental	Producto recuperado por reducción de merma	kg/despacho	—	125
Social	Productores vinculados a rutas consolidadas	N.º	0	Por definir en el piloto

Dimensión	Indicador	Unidad	Línea base	Meta del modelo
Social	Distribución del ahorro entre los productores de una ruta	%	—	Proporcional al volumen
Social	Dedicación requerida del líder veredal	h/semana	—	Por definir en el piloto

Los indicadores de la Tabla 30 retoman las dimensiones económica, ambiental y social del triple resultado (Elkington, 1997; Carter y Rogers, 2008) adoptado en el marco de referencia, y añaden una dimensión operativa que mide el funcionamiento de la coordinación. La línea base de 2.355 kg y la meta de 4.318 kg por viaje resultan de dividir los 181.342 kg semanales estimados en la Tabla 33 entre 77 y 42 viajes, respectivamente; por ello, la meta no equivale a utilizar el vehículo al 100 % de su capacidad en todos los recorridos. Los tres indicadores sociales no pueden medirse hoy, porque el esquema de coordinación aún no existe en la cadena; se incluyen para que la evaluación abarque las tres dimensiones de la sostenibilidad, pero su medición queda para la fase piloto y no constituye un resultado de este trabajo. El punto crítico de información económica se atiende con el registro que exige la regla R4: al cerrar cada despacho, la hoja de cálculo compartida conserva por productor la cantidad entregada y aceptada, el descuento aplicado y la parte del flete que le corresponde según la regla R6. Con esos datos, cada productor puede conocer su costo logístico por kilogramo, que hoy desconoce. Los costos de producción por rubro, como materiales y mano de obra, quedan fuera de ese registro.

La Figura 2 integra los cuatro conjuntos descritos: los actores y recursos, los flujos de información, producto y decisión que los vinculan, las reglas que gobiernan cada intercambio y los indicadores de desempeño.

Figura 2.
Arquitectura del modelo de coordinación logística propuesto



Las reglas R1 a R6 corresponden a las especificadas en la Tabla 29. El flujo de retroalimentación en línea punteada representa el registro de cierre del despacho (R4).

9.1. Proceso de diseño del modelo

La configuración presentada en la especificación no se adopta de forma directa: cada decisión de diseño responde a un punto crítico identificado en el diagnóstico y se selecciona descartando alternativas de mayor exigencia técnica, económica u organizacional. La Tabla 31 documenta esa trazabilidad: sus seis filas desagregan los cinco puntos críticos del diagnóstico, que son la coordinación entre actores (filas 5 y 6), el registro y la trazabilidad (fila 1), el aprovechamiento de la capacidad de transporte (fila 2) y la medición de la calidad (filas 3 y 4); el quinto, sobre la información económica, se atiende con el sistema de indicadores (Tabla 30).

Tabla 31.
Trazabilidad entre los puntos críticos del diagnóstico y las decisiones de diseño del modelo

Punto crítico identificado en el diagnóstico	**Decisión de diseño**	**Componente del modelo**	**Alternativa descartada y razón**
Registro y trazabilidad: el 100 % de los productores registra de forma informal y ninguno cuenta con trazabilidad formal	Adoptar herramientas digitales de uso corriente y baja inversión para el registro compartido	Flujo de información (C-01 y C-02) · regla R4	Trazabilidad con blockchain (B-03) y sensores IoT (A-03): costo de implementación y complejidad técnica incompatibles con el contexto. Etiquetas con código QR (B-01): impacto ambiental del papel plastificado
Capacidad de transporte: cada productor contrata el transporte de forma individual y despacha en promedio 2.406 kg, cerca de la mitad de la capacidad del vehículo de cinco toneladas	Consolidar cargas mediante recolección multipunto entre productores cercanos	Flujo físico · regla R2	Nodo de acopio: requiere inversión en infraestructura y una figura asociativa formal que hoy no existe. Se conserva como opción de mediano plazo (Capítulo 8)
Medición de la calidad: el punto de cosecha se determina por evaluación visual y los productores declaran una pérdida poscosecha total con mediana del 10 %, sin desagregación por etapa	Incorporar una medición objetiva de madurez como condición de despacho	Flujo de decisiones · regla R1 y refractómetro digital	Continuar con evaluación visual: no elimina la variabilidad entre productores ni permite verificación por el comprador
Medición de la calidad (traslado): el embalaje inadecuado y la manipulación deficiente generan un 2,1 % de merma en transporte	Estandarizar el empaque y el procedimiento de cargue	Flujo físico · canastilla ventilada de 15 kg	Transporte refrigerado: costo incompatible con la estructura de costos del productor
Coordinación entre actores: los despachos se programan sin información previa sobre disponibilidad ni demanda	Activar el despacho por señal de disponibilidad reportada	Flujo de información · regla R3	Calendario fijo de despachos: no se ajusta a la variabilidad del punto de cosecha ni de la demanda
Coordinación entre actores: no existe mecanismo de comunicación entre productores, transportistas y comerciantes	Asignar la función de consolidación a una figura de coordinación por zona	Flujo de decisiones · Líder veredal	Coordinación directa entre todos los actores: multiplica los canales de comunicación y no resuelve la conformación de rutas

Tanto las alternativas tecnológicas como las de distribución que aparecen descartadas en la tabla corresponden a las evaluadas en el Capítulo 8, ambas mediante matriz multicriterio: las primeras en el apartado 8.5 y las segundas en el 8.2.

El criterio que orienta las decisiones es la viabilidad de implementación en las condiciones reales de la cadena. Entre alternativas de desempeño técnico comparable se privilegian aquellas que no exigen inversión inicial significativa, estructura asociativa formal previa ni capacidades técnicas ausentes en los productores, en correspondencia con los criterios de accesibilidad económica, facilidad de adopción y viabilidad técnica ponderados en la matriz. Ese criterio explica que el modelo prescinda de tecnologías de mayor sofisticación pese a su superioridad funcional y delimita, al mismo tiempo, su alcance: el diseño responde a un estado inicial de coordinación y requeriría reformularse si la cadena alcanzara un grado superior de organización.

9.1.1. VSM actual: estado de la cadena sin el modelo

El VSM del estado actual del sistema logístico de los productores de piña de Lebrija, Santander, se presenta en el Apéndice D. En él se identifican las actividades que agregan valor (preparación del terreno, siembra, mantenimiento, cosecha y comercialización) y los desperdicios que reducen la eficiencia del sistema.

Entre las actividades que no agregan valor se encuentran los viajes individuales con carga inferior a la capacidad del vehículo, los tiempos de espera no planificados antes del cargue, las pérdidas por cosecha en estado inadecuado de madurez y los daños mecánicos durante el transporte por embalaje deficiente.

Una proporción significativa del lead time total corresponde al tiempo de maduración del cultivo, que oscila entre 12 y 18 meses desde la siembra hasta la cosecha y no es modificable por el modelo de coordinación logística (Ríos Rojas et al., 2019). Sin embargo, las ineficiencias

identificadas en las etapas poscosecha, como la coordinación del transporte, el cargue, el descargue y la comercialización, sí pueden reducirse mediante la coordinación entre los actores y constituyen el foco de intervención del modelo propuesto.

9.1.2. Componentes del modelo de coordinación logística propuesto

9.1.2.1. Componente 1: flujo de información. Este componente responde a los puntos críticos de registro y trazabilidad y de coordinación entre actores. El flujo de información condiciona a los demás componentes, porque de él provienen los datos de disponibilidad de producto, demanda y programación del transporte. Hoy es informal y reactivo: se resuelve caso a caso por llamada, sin registro ni confirmación de lo acordado.

El modelo lo estandariza con las tres alternativas priorizadas en el Nivel III, organizadas en capas y con C-01 como punto de entrada. La captura en finca se hace por WhatsApp Business, de uso corriente y sin exigir conexión permanente, y la consolidación, en una hoja de cálculo compartida de campos fijos (Figura 3). Como admite registro diferido, funciona en veredas con cobertura intermitente: el productor reporta cuando recupera señal y el líder veredal consolida sobre la última información recibida. La tercera capa, una plataforma web que centraliza el histórico de despachos para los tres actores, se desarrolla como prototipo en este trabajo (Figura 4). En conjunto, el flujo reduciría la dependencia de las llamadas individuales, dejaría un registro histórico de los despachos y permitiría al líder veredal identificar patrones de demanda para planificar las cosechas.

Figura 3.
Plantilla de consolidación de pedidos en Google Sheets

Consolidación de pedidos — Piña MD2 Lebrija — Semana: 12/05/2026

Líder veredal	Zona	Vehículo asignado	Hora de recolección
César Beltrán	El Centro — Vanegas	Camión 5 ton — PLK 347	06:00 AM

#	Código productor	Vereda	Fecha despacho	Cantidad (kg)	°Brix	Canastillas	Estado	Comerciante
1	LEB-001	La Esmeralda	12/05/2026	1.200	12,4°	80	Confirmado	B-021
2	LEB-007	San Lorenzo	12/05/2026	900	11,8°	60	Confirmado	B-034
3	LEB-012	El Centro	12/05/2026	1.500	13,1°	100	Confirmado	B-021
4	LEB-019	Portugal	12/05/2026	800	9,2°	53	En espera	—
5	LEB-025	Vanegas	12/05/2026	600	10,5°	40	Confirmado	B-058
Total despacho				5.000 kg	Prom: 11,4°	333	4 confirmados	100% capacidad

Verde = ≥10 °Brix → Apto para despacho | Rojo = <10 °Brix → Esperar maduración

Figura 4.
Interfaz del prototipo de plataforma web de coordinación logística



La plataforma web de coordinación logística es una herramienta diseñada para facilitar la comunicación y la organización de los despachos de piña entre productores, líderes veredales, transportistas y comerciantes. En ella se puede registrar la disponibilidad de producto, consultar las necesidades de transporte, consolidar cargas, programar rutas y hacer seguimiento a cada despacho. Además, permite conservar un historial de las cantidades enviadas, recibidas y aceptadas, así como de las novedades presentadas durante la entrega. De esta manera, la plataforma busca reducir la desorganización, mejorar el aprovechamiento de los vehículos y facilitar el intercambio de información entre los actores de la cadena productiva.

9.1.2.2. Componente 2: flujo físico. Este componente responde al punto crítico de aprovechamiento de la capacidad de transporte y a la parte del punto crítico de calidad que ocurre en el traslado. El flujo físico sustituye parte de los viajes individuales por recolecciones multipunto, cuando la carga conjunta respeta el límite de capacidad. Un vehículo de cinco toneladas recorre las fincas de una misma zona veredal, recoge la carga compatible de los productores de la ruta y hace un único viaje a la Central de Abastos de Bucaramanga; cuando el volumen excede esa capacidad, se mantiene el viaje individual necesario.

Las rutas se dimensionan con la ubicación y el volumen estimado de los 21 productores entrevistados, cuyas fincas están en diez veredas. Los 77 despachos semanales no pueden agruparse únicamente por cercanía, porque cada vehículo debe respetar el límite de 5.000 kg. Al comprobar los volúmenes de la Tabla 33, la configuración factible requiere 42 viajes vehiculares: 36 rutas compartidas y seis viajes individuales. La Tabla 32 presenta la distribución por zona y la distancia adicional de las rutas compartidas.

Tabla 32.
Conformación de rutas consolidadas por zona y distancia incremental

Zona de agrupación	Despachos semanales	Viajes propuestos (compartidos + individuales)	Distancia adicional (km)
La Aguada	32	17 (15 + 2)	5,2
El Salado y Santero	20	10 (10 + 0)	4,0
La Puente	8	4 (4 + 0)	7,3
Santo Domingo	8	5 (3 + 2)	10,7
Aguirre y El Oso	7	4 (3 + 1)	4,8
Piedras Negras y Manchadores	2	2 (1 + 1)	7,2
Total	**77**	**42 (36 + 6)**	**4,78**

Nota. Los valores entre paréntesis corresponden a viajes compartidos + viajes individuales. Las distancias se midieron en cartografía digital sobre la vía carreteable; el promedio total incorpora distancia adicional únicamente en las rutas compartidas.

Las 36 rutas compartidas suman cerca de 201 km semanales; los seis viajes individuales no requieren desvío de recolección. En consecuencia, el recorrido semanal pasa de 8.470 km en el escenario actual a 4.821 km en el propuesto, con una reducción de 3.649 km (43,1 %), frente a una disminución del 45,5 % en el número de viajes. La diferencia entre ambos porcentajes corresponde al desvío de la recolección multipunto.

El volumen movilizado en cada despacho se deriva de los datos reportados por los productores, dado que las entrevistas no indagan directamente en esa magnitud. La Tabla 33 presenta el resultado.

Tabla 33.
Volumen estimado por despacho según los datos reportados por cada productor

Código	Hectáreas	Rendimiento (piñas/ha)	Ciclo (meses)	Despachos/semana	Volumen por despacho (kg)
P-01	13	40.000	14	6	1.952
P-02	12	40.000	14	4	2.702
P-03	10	38.000	14	3	2.852
P-04	8	35.000	15	3	1.962
P-05	5	38.000	15	1	3.993
P-06	6	40.000	14	2	2.702
P-07	4	38.000	16	3	998
P-08	5	40.000	15	3	1.401
P-09	20	40.000	14	7	2.573
P-10	17	40.000	14	5	3.062
P-11	18	38.000	15	6	2.396

Código	Hectáreas	Rendimiento (piñas/ha)	Ciclo (meses)	Despachos/semana	Volumen por despacho (kg)
P-12	6	40.000	14	3	1.801
P-13	6	40.000	15	1	5.044
P-14	5	38.000	14	3	1.426
P-15	5	37.000	15	2	1.944
P-16	14	40.000	15	5	2.354
P-17	20	38.000	14	6	2.852
P-18	10	40.000	15	4	2.102
P-19	8	38.000	15	3	2.130
P-20	3	38.000	15	2	1.198
P-21	18	38.000	14	5	3.080
Promedio	**—**	**—**	**14,6**	**3,7**	**2.406**

El volumen se calcula como el producto del área, el rendimiento y el peso unitario promedio de 1,365 kg (mezcla de calibres del apartado 7.3.4), dividido entre la duración del ciclo en semanas, obtenida al multiplicar el ciclo en meses por 4,33 semanas/mes y la frecuencia de despacho. Los datos de origen se presentan en el Apéndice A.

El valor promedio simple de 2.406 kg por productor es cercano al supuesto de 2.500 kg adoptado para los cálculos, que lo supera en un 3,9 %, por lo que las estimaciones del Capítulo 10 deben leerse como un límite ligeramente optimista. La comprobación despacho a despacho genera la siguiente asignación factible: en La Aguada, 3 viajes P-21 + P-07 (4.078 kg), 2 viajes P-21 + P-20 (4.278 kg), 3 viajes P-03 + P-19 (4.982 kg), 4 viajes P-17 + P-18 (4.954 kg), 3 viajes P-11 + P-11 (4.792 kg) y 2 viajes individuales de P-17 (2.852 kg); en El Salado y Santero, 5 viajes P-09 + P-16 (4.927 kg), 2 viajes P-09 + P-15 (4.517 kg) y 3 viajes P-01 + P-01 (3.904 kg); en La Puente, 2 viajes P-06 + P-08 (4.103 kg), 1 viaje P-08 + P-14 (2.827 kg) y 1 viaje P-14 + P-14 (2.852 kg); en Santo Domingo, 3 viajes P-10 + P-12 (4.863 kg) y 2 viajes individuales

de P-10 (3.062 kg); en Aguirre y El Oso, 3 viajes P-02 + P-04 (4.664 kg) y 1 viaje individual de P-02 (2.702 kg); y en Piedras Negras y Manchadores, P-13 moviliza 5.000 kg en un viaje individual y sus 44 kg restantes se incorporan al viaje de P-05, cuya carga pasa de 3.993 a 4.037 kg. Para P-09 se adopta Santero como punto de recolección, de acuerdo con la zona usada en la Tabla 32; el Apéndice A registra también Santa Rosa, por lo que la finca efectiva de salida debe confirmarse antes de programar la ruta. La asignación moviliza 181.342 kg semanales en 42 viajes, con un promedio de 4.318 kg por viaje, y ningún vehículo supera el límite de 5.000 kg.

9.1.2.3. Componente 3: flujo de decisiones. Este componente responde al punto crítico de medición de la calidad en origen y completa la atención de la coordinación entre actores mediante la figura del líder veredal. El flujo de decisiones define quién decide qué, cuándo y con qué información. Hoy cada productor decide cuándo cosechar, cuándo despachar y a qué precio vender, sin información compartida con los demás actores.

El modelo propone una estructura de gobernanza de tres niveles:

Nivel operativo (Productor): pasa a decidir el momento de cosecha con base en la medición objetiva de grados Brix, frente a los criterios de color, olor o calendario que hoy emplean diecinueve de los veintiún entrevistados (≥12 °Brix, umbral de madurez fijado por el Codex Alimentarius para la piña fresca destinada al consumo; FAO, 1993), registra la disponibilidad de producto en el Google Form y prepara el cargue según el horario establecido por la ruta.

Nivel táctico (Líder veredal): consolida los pedidos de los productores de su zona en la hoja compartida de Google Sheets, construye la ruta de recolección, coordina con el transportista y hace seguimiento al despacho. Esta figura puede ser un productor de mayor experiencia o un representante elegido por los productores de la vereda. El diseño inicial no

contempla contraprestación por esa carga de trabajo, condición que el apartado de efectos del modelo sobre los actores identifica como el principal riesgo de sostenibilidad del esquema.

Nivel estratégico (Asociación de productores en la fase de consolidación): cuando el esquema de rutas consolidadas muestre resultados, se recomienda formalizar la coordinación en una asociación de productores que negocie con compradores y transportistas, administre el sistema de información y gestione el acceso a programas de apoyo estatal. No es requisito para iniciar el modelo: hoy ninguno de los 21 productores está asociado y su disposición a colaborar es condicionada a transparencia, reglas claras y reparto equitativo en doce casos, indecisa en seis y de rechazo por desconfianza en dos. Por eso, la formalización solo se plantea cuando el esquema informal haya demostrado esas condiciones.

9.1.3. Efectos del modelo sobre los actores de la cadena

El modelo no produce beneficios uniformes: redistribuye costos, cargas de trabajo y márgenes, y un esquema que beneficie a un eslabón a costa de otro no se sostiene en el tiempo.

El efecto mayor recae sobre el transportista, porque la configuración factible reduce los viajes semanales de 77 a 42 (45,5 % menos). Con la tarifa por viaje constante absorbería todo el ajuste y no tendría incentivo para participar, de modo que la ruta compartida debe reconocer la carga y el recorrido. Con los costos de T-01, único transportista que los desagrega ($50.000 de ACPM, $13.000 de peaje y $12.000 de entrada y descargue, es decir, $75.000 por viaje), la contribución por despacho es de $233.000 ($308.000 − $75.000). Para conservar la contribución agregada de los 77 despachos mediante 42 viajes, la tarifa promedio de referencia sería cercana a $502.000 por viaje, equivalente a unos $1.780 por canastilla. El valor debe diferenciarse entre las 36 rutas compartidas y los seis viajes individuales según carga y recorrido; no constituye una tarifa acordada ni permite atribuir ahorro de transporte en el escenario base.

Para el productor, la ganancia económica cuantificada no está en el flete ni en adicionar el descuento comercial, sino exclusivamente en el escenario de reducción de la pérdida poscosecha total declarada. La merma en transporte se mantiene como subindicador de control y el descuento en destino como efecto comercial no aditivo. A cambio, el productor cede autonomía: se sujeta al calendario de una ruta compartida y a cosechar según una medición que hoy solo 2 de los 21 practican. Esa pérdida de autonomía es coherente con que doce productores condicionen su participación a la transparencia, las reglas claras y el reparto equitativo, seis estén indecisos y dos la rechacen por desconfianza.

Al comerciante el modelo le ofrece previsibilidad de volumen y un registro del compromiso de entrega, que hoy no existe, aunque veinte de los 21 coordinan por llamada o WhatsApp con casi ocho días de anticipación. El líder veredal, en cambio, es una figura nueva que concentra la consolidación de pedidos, el armado de la ruta y el seguimiento, sin contraprestación en el diseño inicial.

Tabla 34.
Efectos del modelo sobre cada actor de la cadena

Actor	Qué gana	Qué asume o pierde	Condición para su participación
Productor	Reducción de la pérdida poscosecha total, control específico de la merma en transporte, mayor previsibilidad de la entrega y menor exposición al descuento por calidad; eventual ahorro en transporte sujeto a la tarifa que se negocie	Pérdida de autonomía sobre el momento y horario de despacho; sujeción al calendario de la ruta compartida	Que el ahorro compense la pérdida de flexibilidad
Transportista	Rutas con cargas compatibles y mayor valor por servicio; tarifa promedio de referencia cercana a $502.000 por viaje frente a $308.000 por despacho individual	Reducción del 45,5 % en el número de viajes contratados, de 77 a 42 por semana	Que la tarifa de la ruta consolidada compense el menor volumen de servicios
Comerciante mayorista	Previsibilidad de volumen y calidad; registro verificable del compromiso de entrega	Necesidad de coordinar con una figura intermedia y de registrar el cierre de cada entrega; menor margen para aplicar descuentos por calidad,	Que la previsibilidad del abastecimiento compense el esfuerzo de coordinación y la pérdida del descuento por calidad

Actor	Qué gana	Qué asume o pierde	Condición para su participación
		mecanismo que hoy le traslada al productor el costo de la merma	
Líder veredal	Posición de coordinación y capacidad de negociación colectiva	Carga de trabajo adicional de consolidación y coordinación, no remunerada en el diseño inicial	Que la función se reconozca mediante compensación o rotación entre productores

La redistribución más significativa, aunque no es la que el modelo persigue, ocurre entre el productor y el comerciante. Los 21 comerciantes entrevistados reportan aplicar un descuento promedio del 5,6 % por problemas de calidad, lo que traslada al productor el costo del deterioro en cosecha y transporte. Este porcentaje no se adiciona a la pérdida poscosecha total declarada, porque puede valorar el mismo daño físico. Si la fruta llega en mejores condiciones, el descuento pierde base y ese valor podría regresar al productor; no obstante, el estudio no lo incorpora al ahorro económico para evitar doble conteo. El comerciante perdería la herramienta con la que hoy compensa el riesgo de calidad, y su incentivo para participar pasaría a ser la seguridad del abastecimiento, algo que conviene anticipar en la negociación. El riesgo del líder veredal no se resuelve ajustando un precio; la Tabla 34 lo consigna y su tratamiento corresponde a la fase de implementación.

10. Evaluación ex ante de los resultados del modelo

Este capítulo evalúa ex ante el aporte potencial del modelo, siguiendo las actividades de la Fase 5 (apartado 5.5). Tras declarar las premisas de la estimación, se analiza la contribución de los tres mecanismos del modelo: la consolidación de carga, con sus efectos sobre el costo de transporte y las emisiones; el intercambio de información, y la programación conjunta de despachos. Después se cuantifica el escenario de reducción de la pérdida poscosecha total, se conserva la merma en transporte como subindicador no aditivo y se analiza el comportamiento del ahorro bajo un precio desfavorable. Con esos resultados se valora el

aporte del modelo frente a los cinco puntos críticos del diagnóstico y se exponen sus limitaciones y riesgos, las oportunidades de una futura implementación y las recomendaciones para una prueba piloto.

Antes de estimar el ahorro conviene aproximar el costo de implementación del modelo. El refractómetro digital cuesta entre $80.000 y $350.000 por unidad según el proveedor, y basta un instrumento por grupo de productores. WhatsApp Business y Google Sheets son gratuitos; su único costo asociado es la capacitación inicial, estimada en dos jornadas gestionables a través del SENA regional. El empaque en canastillas ya se emplea parcialmente en la cadena (Apéndice A), por lo que su costo incremental es mínimo. En conjunto, la implementación se estima en menos de $500.000 por productor en la fase inicial, es decir, como máximo el 20,5 % del ahorro mensual proyectado ($2.437.500). Esta aproximación no incluye el teléfono inteligente ni el plan de datos que requieren las herramientas de información, porque el estudio no levanta información sobre su tenencia; su omisión subestima el costo real y se declara limitación.

10.1. Premisas de la estimación

El cálculo parte de nueve premisas, cada una con su sustento y su limitación: cuatro corresponden a datos de campo, una a parámetros de fuente oficial, una a una estimación derivada y tres a supuestos (uno de configuración, uno de reducción de la pérdida total y uno de control del subindicador de transporte). Ninguna proviene de una medición posterior a la implementación, que no se ha realizado.

- Premisa 1 (dato). El flete es de $2.000 por canastilla cuando el transportista asegura carga suficiente y de $400.000 a $500.000 por viaje (referencia de $450.000) cuando no la asegura. Sustento: los productores declaran pagar por canastilla (media de $2.009; rango de $2.000 a $2.200) y los transportistas reportan la tarifa por viaje (Apéndice A).

Limitación: con 42 viajes, la tarifa promedio de referencia que conserva la contribución agregada del transportista sería de unos $502.000 por viaje, pero debe negociarse según carga y recorrido.

- Premisa 2 (supuesto de configuración). Cada ruta compartida reúne hasta dos despachos cercanos cuya carga conjunta no supera 5.000 kg. La comprobación de los volúmenes de la Tabla 33 genera 36 rutas compartidas y seis viajes individuales; en Piedras Negras y Manchadores, P-13 moviliza 5.000 kg y sus 44 kg restantes se incorporan al viaje de P-05. Limitación: los volúmenes son estimaciones y la asignación debe confirmarse con la disponibilidad real antes del corte.
- Premisa 3 (supuesto). La pérdida poscosecha total declarada baja del 10 % al 5 % con la medición de grados Brix y la mejora de las prácticas de manipulación. Sustento: la medición de sólidos solubles permite establecer un criterio objetivo de madurez; en piña MD-2, los sólidos solubles aumentan con el estado de madurez (Ding y Syazwani, 2016), y el Codex Alimentarius fija un mínimo de 12 °Brix para la piña fresca (FAO, 1993). Limitación: la reducción al 5 % es un supuesto de las autoras, no una medición, y el 10 % es una declaración global que no permite separar pérdidas por etapa.
- Premisa 4 (supuesto de control). La merma reportada por los transportistas baja del 2,1 % al 1 %. Sustento: los transportistas reportan daños del 1 % al 3 % atribuidos a la manipulación y a las vías, y la literatura describe el daño mecánico asociado al manejo y al transporte de productos frescos (Al-Dairi et al., 2022). Limitación: funciona como subindicador operativo posiblemente contenido en la pérdida poscosecha total; por ello, su reducción no se suma como ahorro económico independiente.
- Premisa 5 (dato). El precio de referencia es de $1.300/kg, correspondiente al calibre pareja, con un escenario desfavorable de $800/kg, precio del calibre pipo (apartado 7.3.5). Limitación: el modelo no incorpora estacionalidad ni tendencia del precio.

- Premisa 6 (estimación derivada). Cada despacho moviliza unos 2.500 kg, valor cercano al promedio derivado de 2.406 kg (unas 148 canastillas de 16,3 kg), al que supera en un 3,9 %. Los 77 despachos semanales equivalen a 3,7 por productor y se proyectan a 15 al mes con cuatro semanas. Limitación: se asume cosecha uniforme en el ciclo; el volumen real varía entre 998 y 5.044 kg según el productor; como el supuesto de 2.500 kg supera el promedio, el ahorro estimado puede estar sobrestimado en una proporción similar.
- Premisa 7 (dato). La distancia base es de 110 km ida y vuelta, más el desvío medido en cartografía digital para cada ruta. Limitación: se mide entre extremos de vereda, por lo que sobreestima el desvío dentro de una misma vereda.
- Premisa 8 (parámetros de fuente). Consumo de 0,35 L/km y factor de 2,68 kg de CO_2 por litro de diésel (IDEAM, 2016; UPME, 2015). Limitación: no considera carga, pendiente ni estado de la vía, y se aplica igual a toda la flota, aunque las capacidades van de 2,35 a 11 toneladas.
- Premisa 9 (dato). El escenario base son los 77 despachos semanales de los 21 productores entrevistados. Limitación: describe la muestra y no el municipio; la proyección al subsector supone la misma frecuencia de despacho y que los registros de Compite 360 corresponden a productores activos, condiciones no verificadas.

10.2. Aporte de la consolidación de carga

La consolidación de carga atiende principalmente el punto crítico 3, porque agrupa en una misma ruta los volúmenes que actualmente se movilizan de forma individual. Bajo la Premisa 2 y el límite de 5.000 kg, los 77 despachos semanales se atenderían mediante 42 viajes vehiculares (45,5 % menos) y la distancia recorrida disminuiría de 8.470 a 4.821 km por semana (43,1 %). En el escenario base no se atribuye un ahorro en el flete (el cálculo se desarrolla en el apartado 10.3): el costo se mantiene en $308.000 por despacho y $4.620.000

al mes por productor. Solo se evitarían $142.000 en los despachos en los que, por falta de carga, se aplicaría la tarifa fija de $450.000.

La consolidación también crea una base de volumen para negociar, pero no permite afirmar que la tarifa disminuirá. Para conservar la contribución agregada del transportista se estimó un valor promedio cercano a $502.000 por viaje, equivalente a unos $1.780 por canastilla. El valor no es uniforme: debe diferenciar las 36 rutas compartidas y los seis viajes individuales según carga y recorrido. Por tanto, el aporte cuantitativo se concentra en el uso de la capacidad, la reducción de viajes, la distancia y las emisiones; el efecto monetario depende de una negociación que no se ha realizado. Este mecanismo debe distinguirse de la programación conjunta: la consolidación define qué cargas se agrupan, mientras que la programación establece cuándo se confirma el despacho y en qué orden se realiza la recolección.

10.3. Efecto sobre el costo de transporte

El productor paga $2.000 por canastilla cuando el transportista asegura carga suficiente, y la tarifa fija del viaje cuando no la asegura. Con la mezcla de calibres de la Tabla 20 (61.425 kg en 3.777 canastillas), cada canastilla pesa en promedio 16,3 kg, de modo que un despacho de 2.500 kg equivale a unas 154 canastillas, es decir $308.000, frente a los $450.000 de la tarifa fija. La consolidación no modifica el valor de la canastilla, pero puede contribuir a completar la carga y, con ello, a asegurar que se aplique la tarifa por unidad, según el cálculo de la Ecuación 4. Considerando que cada productor realiza 15 despachos mensuales, el costo mensual de transporte se mantiene en $4.620.000 (15 despachos × $308.000), dado que la tarifa por canastilla no varía con la consolidación.

Ecuación 4. Ahorro en transporte por productor por despacho.

$$A_t = (C_{ta} - C_{tp})$$

Donde:

$A_t =$ ahorro en transporte por productor por despacho

$C_{ta} =$ costo del despacho con tarifa fija, cuando la carga no alcanza ($450.000)

$C_{tp} =$ costo del despacho con tarifa por canastilla y carga completa ($308.000)

$$A_t = (\$450.000 - \$308.000)$$

$$= \$142.000 \text{ por despacho en que la carga habría resultado insuficiente}$$

Este ahorro no se materializa en todos los despachos. Los veintiún productores declaran pagar el flete por canastilla, de modo que el transportista absorbe hoy el riesgo de movilizar carga incompleta y concede la tarifa por unidad. El componente opera únicamente cuando esa concesión no ocurre, frecuencia que el diagnóstico no cuantifica, razón por la cual la estimación del ahorro total no lo incorpora. En el transporte, la consolidación elimina ese riesgo y crea una base de volumen para negociar la tarifa, aunque no reduce el valor por canastilla.

10.4. Efecto sobre las emisiones

La reducción del recorrido semanal calculada en el Capítulo 9 (Tabla 32) se traduce en una disminución del consumo de combustible y de las emisiones asociadas al transporte. Para cuantificarla se aplica la Ecuación 5.

Ecuación 5. Emisiones de CO_2 por escenario

$$ECO_2 = Km \times Cdie \times Fco_2$$

Donde:

$ECO_2 =$ *emisiones totales de* CO_2 (kg)

$Km =$ *Kilómetros recorridos por semana* (8.470 *en escenario actual*; 4.821 *en escenario propuesto*)

$$Cdie = consumo\ de\ diésel\ por\ kilómetro\ (0{,}35\ L/km)$$

$$\mathrm{Fco_2} = \text{factor de emisión del diésel } (2{,}68\ \mathrm{kg\ CO_2/L})$$

Aplicando la ecuación para el escenario actual:

$$\mathrm{ECO^2}\text{actual} = 8.470 \times 0{,}35 \times 2{,}68 = 7.945\ \mathrm{kg\ CO_2}\ \text{por semana}$$

Aplicando la ecuación para el escenario propuesto:

$$\mathrm{ECO_2}\ \text{propuesto} = 4.821 \times 0{,}35 \times 2{,}68 = 4.522\ \mathrm{kg\ CO_2}\ \text{por semana}$$

La reducción semanal de emisiones de $\mathrm{CO_2}$ es:

$$\Delta\mathrm{CO_2} = 7.945 - 4.522 = 3.423\ \mathrm{kg\ CO_2}\ \text{evitados por semana}$$

Proyectando esta reducción a escala mensual con el factor promedio de 4,33 semanas por mes, aplicado únicamente a la conversión del indicador ambiental:

$$\Delta\mathrm{CO_2}\ \text{mensual} = 3.423 \times 4{,}33 = 14.822\ \mathrm{kg\ CO_2/mes}$$

$$\approx 14{,}8\ \text{toneladas de}\ \mathrm{CO_2}\ \text{evitadas al mes}$$

La Tabla 35 sintetiza los indicadores de desempeño ambiental del modelo, calculados sobre los 21 productores entrevistados y sus recorridos medidos.

Tabla 35.
Indicadores de desempeño ambiental del modelo de coordinación logística propuesto

Indicador	Escenario actual	Escenario propuesto	Reducción
Viajes por semana	77	42	45,5 %
Distancia recorrida (km/semana)	8.470	4.821	43,1 %
Consumo estimado de diésel (L/semana)	2.965	1.687	43,1 %
Emisiones de CO_2 (kg/semana)	7.945	4.522	43,1 %
Emisiones evitadas (kg/semana)	—	—	**3.423**
Emisiones evitadas al mes (t CO_2)	—	—	**≈ 14,8**

Nota. Cálculos basados en IDEAM (2016) y UPME (2015).

Se estima que la configuración factible de rutas evitaría cerca de 14,8 toneladas de CO_2 al mes entre los productores entrevistados. Esta cuantificación ex ante se limita a las emisiones asociadas al consumo de diésel; no estima otros efectos ambientales o viales. En ese alcance, la propuesta se relaciona con la reducción del desperdicio de alimentos y de las emisiones asociadas al transporte.

Los valores anteriores corresponden a los 21 productores entrevistados. La Tabla 36 presenta la proyección al conjunto de empresas del subsector registradas en el municipio, aplicando la misma proporción de reducción.

Tabla 36.
Escenarios de reducción de emisiones según base de cálculo

Escenario	Base de cálculo	Km evitados (semana)	CO_2 evitado (t/mes)
Muestra analizada	21 productores entrevistados · 77 despachos	3.649	14,8
Proyectado	63 empresas del subsector · 231 despachos	10.947	44,5

Nota. El escenario de la muestra se calcula con información de los productores entrevistados y con las distancias estimadas en el estudio; no corresponde a una medición posterior a la implementación. El escenario proyectado aplica la misma proporción al total de empresas del subsector de frutas tropicales registradas en Compite 360 y hereda las limitaciones declaradas en la Premisa 9.

10.5. Aporte del intercambio de información

Frente al punto crítico 2, el flujo de información sustituye el registro aislado en cuaderno y los acuerdos por llamada o mensaje sin constancia por un registro estructurado y compartido. WhatsApp Business funciona como canal de reporte y confirmación; la hoja de Google Sheets consolida la disponibilidad, el volumen, los grados Brix, las canastillas despachadas, la cantidad recibida y aceptada, las novedades y el cierre de cada entrega; y el

prototipo de plataforma web permitiría conservar el histórico, sujeto a una validación posterior en campo. Con estos mecanismos se habilita la trazabilidad desde la finca hasta el destino, se puede cruzar lo despachado con lo recibido y pagado, y se genera evidencia para identificar en qué etapa se presenta una diferencia o un daño.

El registro de la lectura de grados Brix y de las novedades de recepción también ofrece un soporte para controvertir descuentos aplicados por inspección visual. Este soporte no elimina por sí mismo el descuento ni demuestra la responsabilidad de un actor, pero permite que la discusión se base en datos del lote y no únicamente en apreciaciones posteriores. De manera complementaria, la visibilidad compartida de la disponibilidad y de las confirmaciones atiende parcialmente el punto crítico 1, porque reduce la dependencia de comunicaciones bilaterales que no precisan horarios, cupos ni compromisos de entrega.

Frente al punto crítico 5, la hoja compartida y el sistema de indicadores permiten incorporar campos de costos por rubro, valor del flete, volumen movilizado y resultado de cada despacho. Así, los valores calculados en el diagnóstico, $970 por kilogramo de costo y $418 por kilogramo de margen pueden convertirse en referencias de seguimiento y no permanecer como estimaciones externas a la gestión cotidiana. El aporte es cualitativo, dado que el modelo no fue implementado y no se midieron mejoras en la exactitud, frecuencia o uso de los registros. En consecuencia, no se atribuye al intercambio de información un ahorro monetario adicional; su contribución consiste en crear trazabilidad, memoria operativa y soporte para decisiones y negociaciones futuras.

10.6. Aporte de la programación conjunta de despachos

La programación conjunta atiende de manera directa el punto crítico 1. La anticipación promedio de 7,9 días con la que el comerciante formula el pedido puede emplearse como horizonte preliminar para comunicar la demanda, reservar capacidad y advertir a los

productores sobre la fecha probable de despacho. Antes del horario de corte, cada productor debe confirmar el volumen disponible, los grados Brix y la fecha estimada de cosecha. Con base en esos reportes, el líder veredal conforma la ruta, confirma el vehículo y comunica los puntos de recolección y el horario durante la noche previa al despacho.

El horario de corte evita que la ruta se construya con información abierta o cambiante, mientras que la secuencia de recolección ordena las paradas y reduce esperas y exposiciones innecesarias del producto. Para el piloto, la secuencia debe definirse con los predios georreferenciados, el volumen de cada productor, el tiempo de cargue y la condición de ubicar al productor de mayor volumen al final cuando ello reduzca la permanencia de la fruta en espera. A diferencia de la consolidación, que agrupa físicamente la carga, la programación conjunta coordina tiempos, confirmaciones y responsabilidades. Su aporte se valora de forma cualitativa, porque el estudio no implementó el procedimiento ni midió puntualidad, tiempos de espera o cumplimiento de horarios.

10.7. Efecto sobre la pérdida poscosecha total declarada

Para la evaluación ex ante se supone que el uso sistemático del refractómetro digital como filtro de calidad, junto con mejores prácticas de manipulación, permitiría reducir la pérdida poscosecha total declarada del 10 % al 5 % (Premisa 3). La medición de grados Brix aportaría un criterio objetivo para decidir el momento de cosecha; sin embargo, la reducción a la mitad es un supuesto de las autoras y no un resultado medido en la cadena estudiada. En piña MD-2, el contenido de sólidos solubles aumenta con el estado de madurez del fruto (Ding y Syazwani, 2016), lo que respalda el uso del °Brix como criterio de cosecha junto con el mínimo de 12 °Brix del Codex Alimentarius (FAO, 1993). El ahorro asociado a este escenario se calcula mediante la Ecuación 6.

Ecuación 6. Ahorro por reducción de la pérdida poscosecha total declarada

$$A - ppt. = (M - a. - M - p.) \times Q \times P$$

Donde:

$A - ppt. =$ *ahorro por reducción de la pérdida poscosecha total declarada*

$\mathrm{M_a} =$ porcentaje de merma actual (10 % $=$ 0,10)

$\mathrm{M_p} =$ porcentaje de merma propuesto (5 % $=$ 0,05)

$\mathrm{Q} =$ cantidad producida (2.500 kg)

$\mathrm{P} =$ precio por kilogramo ($1.300)

$$A - ppt. = (0{,}10 - 0{,}05) \times 2.500 \times \$1.300 = 0{,}05 \times 2.500 \times \$1.300$$

$$= \$162.500 \; por \; despacho$$

10.8. Seguimiento de la merma durante el transporte

Para la evaluación ex ante se conserva como subindicador la reducción de la merma reportada por los transportistas del 2,1 % al 1 % (Premisa 4). La literatura respalda la necesidad de controlar el daño mecánico durante la manipulación y el traslado (Al-Dairi et al., 2022), pero no demuestra la magnitud de reducción adoptada para esta cadena. Como el 2,1 % puede estar contenido en la pérdida poscosecha total declarada por los productores, su valoración se presenta únicamente como referencia y no se adiciona al ahorro económico.

Ecuación 7. Valor económico de referencia de la reducción del subindicador de transporte

$$\mathrm{A_{mt}} = (\mathrm{M_{ta}} - \mathrm{M_{tp}}) \times \mathrm{Q} \times \mathrm{P}$$

Donde:

$A - mt.$

$=$ *valor económico de referencia de la reducción de la merma en transporte*

$\mathrm{M_{ta}} =$ porcentaje de merma actual en transporte (2,1 % $=$ 0,021)

$\mathrm{M_{tp}} =$ porcentaje de merma propuesto en transporte (1 % $=$ 0,01)

$Q =$ cantidad transportada (2.500 kg)

$P =$ precio por kilogramo ($1.300)

$$A - mt. = (0{,}021 - 0{,}01) \times 2.500 \times \$1.300$$

$$= \$35.750\ por\ despacho\ (referencia\ no\ aditiva)$$

10.9. Ahorro total conservador

Para evitar doble conteo, el ahorro económico del modelo se limita al escenario de reducción de la pérdida poscosecha total declarada. La merma de transporte se mantiene como subindicador para el seguimiento operativo, pero no se suma como un componente independiente. La Ecuación 8 presenta el criterio conservador.

Ecuación 8. Ahorro total conservador por despacho con el modelo propuesto

$$A - total. = A - ppt. = \$162.500\ por\ despacho$$

Proyectado a los 15 despachos mensuales que realiza en promedio cada productor: $162.500 × 15 = $2.437.500 mensuales.

La Tabla 37 presenta la comparativa consolidada de costos entre el escenario actual y el escenario propuesto.

Tabla 37.
Comparativa de costos entre el escenario actual y propuesto

Rubro	Escenario actual	Escenario propuesto	Ahorro por despacho
Pérdida poscosecha total declarada	*10 % × 2.500 kg × $1.300/kg = $325.000*	*5 % × 2.500 kg × $1.300/kg = $162.500*	$162.500
Costo de transporte por productor	$308.000 por despacho ($4.620.000 / mes)	$308.000 por despacho ($4.620.000 / mes)	Sin ahorro
Merma durante el transporte (subindicador no aditivo)	2,1 % × 2.500 kg × $1.300/kg = $68.250	1 % × 2.500 kg × $1.300/kg = $32.500	No se adiciona
Ahorro total por despacho			$162.500
Costo mensual de transporte	$4.620.000	$4.620.000	**Sin ahorro**

Ahorro mensual total estimado	**$2.437.500**

El modelo podría generar un ahorro estimado de $162.500 por despacho de 2,5 toneladas mediante la reducción de la pérdida poscosecha total declarada del 10 % al 5 %. Como cada productor realiza en promedio 15 despachos al mes, el beneficio mensual asciende a $2.437.500 por productor. La posible reducción de la merma en transporte se conserva como subindicador de control y no se suma, porque puede estar incluida en el porcentaje total declarado. El beneficio del modelo proviene de la reducción de pérdidas y no del costo de transporte.

La totalidad del beneficio económico estimado depende, por tanto, de la Premisa 3, que plantea una reducción de la pérdida poscosecha total tomada por analogía con la literatura y no medida en la cadena estudiada. La Premisa 4 se utiliza únicamente para controlar la merma específica del transporte y no genera un ahorro adicional. En una eventual implementación piloto, la primera medición debe establecer la pérdida total y su distribución por etapa antes y después de introducir el filtro objetivo de madurez y la estandarización del empaque. Si la reducción total no se verifica en campo, el beneficio económico aquí estimado no se materializa; se mantendrían, en cambio, los efectos del modelo sobre la coordinación de los despachos, la trazabilidad de la operación y las emisiones.

10.10. Ahorro bajo un precio desfavorable

Los cálculos anteriores emplean el precio de referencia de $1.300/kg, correspondiente al calibre pareja. Dado que el diagnóstico identifica que el precio de comercialización puede

descender hasta $800/kg (nivel en el que el margen del productor se torna negativo), la Tabla 38 compara los ahorros estimados en ambos escenarios.

Tabla 38.
Comparación de ahorros estimados según escenario de precio

Rubro	Escenario $1.300/kg	Escenario $800/kg
Ahorro por reducción de la pérdida poscosecha total declarada (del 10 % al 5 %)	$162.500	$100.000
Ahorro por reducción de costo de transporte (excluido del total; véase el apartado de reducción del costo de transporte)	Sin ahorro	Sin ahorro
Valor de referencia del subindicador de transporte (no aditivo)	$35.750	$22.000
Ahorro total por despacho	$162.500	$100.000
Ahorro mensual por productor (15 despachos)	$2.437.500	$1.500.000

Como el ahorro corresponde a kilogramos recuperados valorizados al precio, con P = $800 la Ecuación 6 da $100.000 por despacho y $1.500.000 mensuales por productor, un 38,5 % menos que en el escenario de referencia. La Ecuación 7 muestra $22.000 como valor de referencia para el subindicador de transporte, pero no se adiciona para evitar doble conteo. El flete no entra en ninguno de los dos escenarios, porque la tarifa por canastilla no cambia con la consolidación. A $800/kg el productor vende por debajo de su costo unitario de $970/kg (apartado 7.3.4), de modo que la reducción de pérdidas lo acercaría al punto de equilibrio, pero todo el beneficio queda expuesto a la volatilidad del precio. Este es un análisis de escenarios sobre una sola variable y no un análisis de sensibilidad; un estudio posterior debería evaluar el flete por viaje, el número de productores por ruta, la pérdida efectivamente alcanzable y la frecuencia de despacho.

10.11. Valoración del aporte frente a los puntos críticos

La correspondencia entre los cinco puntos críticos y los mecanismos del modelo permite distinguir los resultados cuantificados, los aportes cualitativos y los valores que

dependen de supuestos no verificados. La Tabla 39 presenta esta valoración sin atribuir al modelo efectos posteriores a una implementación que no se realizó.

Tabla 39.
Aporte potencial del modelo frente a los puntos críticos del diagnóstico

Punto crítico	Mecanismo o componente del modelo	Aporte estimado	Tipo de aporte
PC1. Coordinación entre actores	Programación conjunta; reporte de disponibilidad; horario de corte; secuencia de recolección; WhatsApp Business y hoja compartida.	Permite utilizar los 7,9 días de anticipación como horizonte de planeación y confirmar volúmenes, cupos, horarios y responsables. La reducción de 77 despachos reportados a 42 viajes vehiculares semanales solo se obtiene si opera también la consolidación bajo la Premisa 2.	Cualitativo; la cuantificación está condicionada a la consolidación.
PC2. Registro y trazabilidad	Flujo de información; hoja compartida; registro de grados Brix; regla R4 de cierre del despacho; histórico del prototipo web.	Reemplaza el cuaderno y las comunicaciones sin constancia; cruza lo despachado, recibido, aceptado y pagado; documenta novedades y ofrece soporte para controvertir descuentos por calidad.	Cualitativo.
PC3. Aprovechamiento de la capacidad	Consolidación de carga; ruta multipunto; vehículo de 5 t; canastillas como unidad de conteo.	Despachos atendidos: 77 mediante 42 viajes por semana (45,5 % menos). Distancia: 8.470 a 4.821 km por semana (43,1 %). Emisiones evitadas: 3.423 kg de CO_2 por semana y cerca de 14,8 t al mes. Sin ahorro en el escenario base; se evitan $142.000 solo cuando se aplicaría la tarifa fija de $450.000. Tarifa promedio de referencia para conservar la contribución agregada del transportista: cerca de $502.000 por viaje (aproximadamente $1.780 por canastilla), sujeta a negociación según carga y recorrido.	Cuantitativo.
PC4. Medición de la calidad	Refractómetro digital; canastillas;	Escenario: pérdida poscosecha total	Supuesto.

	estandarización del cargue; registro de calidad y novedades por lote.	declarada de 10 % a 5 %. Ahorro estimado: $162.500 por despacho y $2.437.500 al mes con 15 despachos. La merma en transporte se controla como subindicador del 2,1 % al 1 %, pero no se adiciona al ahorro. Las reducciones no fueron medidas.	
PC5. Información económica	Hoja compartida con costos por rubro; indicadores económicos; registro del flete y del volumen; regla R6 de distribución del flete.	Permite registrar y actualizar los costos, comparar decisiones de despacho y usar como referencia el costo de $970/kg y el margen de $418/kg calculados en el diagnóstico. No se atribuye un ahorro adicional.	Cualitativo.

La valoración muestra que el único aporte económico estimado proviene de la reducción de la pérdida poscosecha total planteada en la Premisa 3, por lo que debe interpretarse como un escenario supuesto. La Premisa 4 conserva la merma en transporte como subindicador operativo no aditivo. La consolidación presenta resultados cuantitativos en viajes, distancia y emisiones, aunque la tarifa continúa sujeta a negociación. El intercambio de información y la programación conjunta aportan condiciones de trazabilidad y coordinación cuya magnitud solo podrá establecerse mediante una prueba piloto.

10.12. Limitaciones y riesgos de implementación

La estimación corresponde a un escenario de operación regular en el que los actores adoptan el esquema y las condiciones del entorno se mantienen estables. La literatura advierte que esa condición rara vez se cumple: los esquemas de logística compartida presentan una brecha persistente entre su potencial y su adopción efectiva, atribuida a la desconfianza entre los participantes, a las diferencias en la disposición a cooperar y a la escasa familiaridad con el concepto (Matusiewicz, 2024). En cadenas de producto fresco, las barreras de eficiencia se clasifican además en un grupo causa que influye sobre las demás y un grupo efecto, lo que

implica que intervenir sobre las segundas sin atender las primeras rinde mejoras limitadas (John y Singh, 2025). Los riesgos de la Tabla 40 surgen de contrastar esos hallazgos con las condiciones de la cadena estudiada.

Tabla 40.
Riesgos de implementación del modelo y medidas de mitigación

Riesgo	Origen en el diagnóstico	Efecto sobre el modelo	Mitigación propuesta
Los productores no sostienen la coordinación	No existe figura asociativa activa en el municipio	Sin reportes de disponibilidad, la ruta no se conforma y el modelo no opera	Iniciar con un grupo piloto reducido de productores con cercanía geográfica y relación previa, antes de escalar
El transportista no acepta la tarifa consolidada	La tarifa se negocia individualmente y no existe acuerdo colectivo	El transportista no participa y la ruta consolidada no se conforma, con lo que se pierden la reducción de viajes y las emisiones evitadas	Negociar la tarifa antes del piloto y documentarla como acuerdo entre las partes
Conectividad intermitente en zona rural	Cobertura de red limitada en las veredas productoras	El reporte de disponibilidad no llega a tiempo y la ruta se conforma con información incompleta	Definir un canal alterno de reporte por voz y un horario de corte con margen
Baja apropiación de las herramientas digitales	Los veintiún productores llevan registro manual en cuaderno y ninguno emplea registro digital	Registro incompleto que compromete la trazabilidad	Capacitación inicial y diseño de la plantilla con el mínimo de campos indispensables
Mayor tiempo de exposición del producto del primer productor de la ruta	La fruta permanece expuesta antes del cargue, práctica identificada como causa de pérdida	La merma podría aumentar en el primer punto de recolección, contrarrestando el beneficio del modelo	Definir la secuencia de recolección con el productor de mayor volumen al final, fijar hora de inicio temprana y establecer un tope de duración de ruta
Dispersión geográfica superior a la prevista	La ubicación de los predios no se georreferencia en este estudio	La distancia incremental de la ruta multipunto podría exceder la estimada, reduciendo el ahorro	Georreferenciar los predios del grupo piloto y recalcular la agrupación antes de la implementación

La limitación de mayor alcance es la ausencia de un análisis espacial de los predios: el desvío de cada ruta se mide entre extremos de vereda (Tabla 32) y no incluye la ubicación exacta de cada finca ni el tiempo de cada parada. Resolverlo exigiría georreferenciar los predios y plantear un problema de ruteo con restricciones de capacidad y ventana de tiempo, lo que

excede el alcance de este trabajo y se propone como su continuación. La omisión no altera el ahorro estimado, que proviene de la reducción de mermas, pero condiciona la viabilidad operativa de las rutas y las emisiones evitadas, que deben leerse como un límite superior.

La segunda limitación es que la plataforma web (Figura 4) es un prototipo que no se ha desplegado ni probado en campo, por lo que su usabilidad y su aporte a la coordinación no se han verificado; además, el costo de alojamiento y mantenimiento no se cuantifica ni se asigna entre los actores. Las dos primeras capas, WhatsApp y hoja compartida, no tienen esta restricción, porque usan herramientas gratuitas ya disponibles.

Una tercera limitación corresponde a la no incorporación directa de los intermediarios en el levantamiento de información y en el diseño operativo del modelo. Aunque estos actores pueden recoger producto de diferentes fincas y consolidar cargas, no fueron entrevistados y sus costos, márgenes y relaciones comerciales no se cuantificaron. En consecuencia, el estudio no permite establecer si la coordinación directa propuesta modificaría el precio recibido por el productor ni cómo afectaría los márgenes de los demás actores. Antes de la implementación, se recomienda validar con productores y comerciantes la presencia real de intermediarios en cada canal de comercialización y determinar si sus funciones pueden ser asumidas por el líder veredal o si deben incorporarse como un perfil adicional en la plataforma.

10.13. Oportunidades para una futura implementación

La implementación gradual puede generar una base de volumen y un historial de cumplimiento que fortalezcan la negociación con transportistas y compradores. Los registros de despachos, calidad, costos y novedades también pueden constituir evidencia para solicitar asistencia técnica, formación o apoyo institucional. Si el piloto demuestra reglas transparentes y beneficios distribuidos de manera equitativa, el esquema podría ampliarse a más productores y servir como antecedente para una figura asociativa encargada de administrar la información,

negociar servicios y coordinar la operación. Estas oportunidades no constituyen resultados medidos, sino posibilidades de desarrollo sujetas a la validación del modelo en campo.

10.14. Recomendaciones para la prueba piloto

Se recomienda iniciar con un grupo piloto reducido de productores cercanos y con disposición a aplicar reglas comunes. Antes de la operación se deben georreferenciar los predios, recalcular la secuencia de recolección y negociar con el transportista una tarifa que reconozca el recorrido multipunto, tomando los $502.000 por viaje únicamente como referencia promedio derivada del caso analizado y no como tarifa acordada. Durante el piloto se debe medir la pérdida poscosecha total y el subindicador de merma en transporte antes y después de introducir el refractómetro, las canastillas y el procedimiento de cargue, utilizando el mismo criterio de medición en ambos momentos. También se debe mantener un canal alterno de reporte por voz para los casos de conectividad intermitente y registrar su uso, con el fin de verificar si la información llega antes del horario de corte.

En síntesis, la evaluación es ex ante: el modelo no fue implementado y, por tanto, los beneficios cuantitativos corresponden a cálculos condicionados por las premisas, mientras que los aportes en coordinación, trazabilidad e información representan capacidades potenciales que requieren validación operativa.

11. Discusión

Este capítulo contrasta los hallazgos con la literatura sobre logística agrícola colaborativa para establecer qué resultados coinciden con otros contextos y cuáles son propios de la cadena analizada.

11.1. La descoordinación como restricción principal

El diagnóstico identifica que los puntos críticos de mayor magnitud no se ubican en la capacidad productiva (la cosecha alcanza un cumplimiento del 100 % y el manejo del cultivo un 82 %) sino en las etapas que requieren coordinación entre actores: gestión de la información y trazabilidad (29 %) y costos y sostenibilidad logística (28 %). Este patrón coincide con lo reportado en la literatura sobre cadenas de producto fresco, donde las barreras de eficiencia se describen como interdependientes y concentradas en los puntos de articulación entre eslabones más que en las operaciones individuales (John y Singh, 2025).

Por eso, mejorar el desempeño agronómico no reduciría de forma significativa las pérdidas ni los costos logísticos: el cuello de botella está en la coordinación, y allí se concentra el modelo.

11.2. La consolidación de cargas en la primera milla

La subutilización de la capacidad vehicular identificada en el diagnóstico (volumen promedio simple de 2.406 kg por despacho frente a vehículos de 5.000 kg) corresponde a un problema documentado en la literatura sobre logística de primera milla de productos agrícolas frescos, donde la dispersión de los productores y la baja escala individual generan estructuras de transporte ineficientes (Han et al., 2026). El tratamiento habitual de este problema consiste en formular la consolidación como un problema de ruteo con restricciones de capacidad y ventana de tiempo, incorporando los costos de desplazamiento, cargue y descargue.

El presente trabajo se aparta de ese tratamiento: agrupa a los productores por cercanía y estima la distancia adicional de cada ruta (Tabla 32), pero no resuelve un problema de ruteo ni optimiza el trazado. Esa simplificación no afecta el ahorro estimado, que proviene de la reducción de mermas, pero obliga a leer la viabilidad de la agrupación y las emisiones evitadas como un límite superior, y define la línea de continuación más inmediata del estudio.

11.3. Tecnologías accesibles frente a soluciones de alta sofisticación

La matriz multicriterio asigna las mayores puntuaciones a herramientas de uso corriente y costo cercano a cero, mientras que las alternativas basadas en blockchain y sensores IoT quedan en las posiciones inferiores. Este resultado responde al diagnóstico: los veintiún productores no tienen un sistema formal de registro ni herramientas digitales de gestión, y ninguno pertenece a una asociación que pueda asumir una inversión colectiva, lo que descarta soluciones con desembolso inicial y competencias técnicas especializadas.

El hallazgo tiene una implicación práctica: en contextos como el estudiado, el retorno de una intervención logística depende menos de la sofisticación de la herramienta que de su probabilidad de adopción efectiva. Una hoja de cálculo compartida que se usa de forma constante aporta más trazabilidad que un sistema avanzado que los productores no operan.

11.4. La asociatividad como condición y como riesgo

El modelo asigna al nivel estratégico la conformación de una figura asociativa, y a la vez identifica la ausencia de esa figura como el principal riesgo de implementación. Esta tensión no es exclusiva del caso analizado. En Colombia, los esquemas colectivos aumentan el poder de negociación del productor y reducen la intermediación, efecto relevante en productos perecederos, donde el poco tiempo para negociar debilita al productor individual (Vargas Prieto et al., 2019). Sin embargo, en organizaciones de pequeños fruticultores de Santander se documentan fallas administrativas y una dependencia del apoyo externo que erosiona su autonomía (Buenhombre y Mariño, 2022).

Las barreras de adopción identificadas en el apartado 10.12 y el análisis de efectos por actor (apartado 9.1.3) refuerzan esa lectura: la viabilidad del esquema depende menos de su eficiencia técnica que de la confianza entre participantes y de una distribución de beneficios

percibida como justa, porque el modelo redistribuye cargas y cada actor debe obtener una compensación proporcional a lo que asume.

11.5. Alcance de los resultados

Los resultados corresponden a una evaluación ex ante realizada sobre una cadena específica, con una muestra no probabilística y sin implementación piloto. En consecuencia, no son generalizables a otras cadenas agroalimentarias ni constituyen una medición de impacto. Su aporte se sitúa en dos planos: la documentación de la estructura de costos y pérdidas de una cadena que no cuenta con caracterización previa, y la formulación de un modelo de coordinación diseñado para condiciones de baja tecnificación y ausencia de figura asociativa, cuya verificación requiere una fase de implementación.

12. Conclusiones y recomendaciones

Esta investigación propone un modelo de coordinación logística para los productores de piña de Lebrija, Santander, en su tramo hasta la Central de Abastos de Bucaramanga. El modelo se construye a partir de la caracterización de la cadena, el diagnóstico de su desempeño y la selección de un esquema de coordinación y de tecnologías accesibles; se especifica en tres componentes y se evalúa ex ante.

12.1. Cumplimiento de objetivos

La Tabla 1 resume el resultado, la evidencia y el alcance de cada objetivo específico.

12.2. Conclusiones

En relación con OE1 (Caracterización del sistema logístico): La cadena involucra seis tipos de actores que operan de forma desarticulada, sin mecanismos formales de coordinación. En 2024, el municipio registra 5.312 hectáreas sembradas y 5.167 cosechadas, con un

rendimiento sobre el área cosechada superior al promedio departamental, potencial que no se traduce en rentabilidad proporcional debido a la ausencia de trazabilidad, la fragmentación de los despachos y la falta de estandarización en los criterios de calidad (Capítulo 6).

En relación con OE2 (Diagnóstico de la cadena): El diagnóstico establece un porcentaje de cumplimiento del 52,9 %, con fortalezas en las etapas agrícolas y puntos críticos en poscosecha, trazabilidad y gestión logística. La pérdida poscosecha total declarada oscila entre el 5 % y el 15 % según el productor, con una mediana del 10 % adoptada como valor de referencia; la merma en transporte del 2,1 % y el descuento económico del 5,6 % se conservan como contrastes no aditivos. Los costos logísticos representan el 12,7 % del costo total. La observación directa registra diez eventos de pérdida, de los cuales seis corresponden a etapas del cultivo y cuatro al tramo logístico, y nueve pueden corregirse sin inversión en infraestructura. El dictamen concluye que el problema principal de la cadena es de articulación logística (Capítulo 7).

En relación con OE3 (Evaluación del esquema de coordinación y de las tecnologías): El análisis multicriterio selecciona el esquema colaborativo de recolección multipunto y, entre nueve alternativas tecnológicas, prioriza cuatro: WhatsApp Business con Google Sheets, formularios digitales con base compartida, plataforma web (como prototipo no probado en campo) y refractómetro digital; blockchain y sensores IoT se descartan por costo, complejidad e infraestructura (Capítulo 8). La trazabilidad no depende de una herramienta dedicada: se obtiene al cruzar el registro en origen de la hoja compartida y el refractómetro con el cierre del despacho en destino (regla R4).

En relación con OE4 (Estructuración del modelo): El modelo integra un flujo de información con herramientas gratuitas, un flujo físico de recolección multipunto y un flujo de

decisiones en tres niveles, con reglas de operación e indicadores ligados a los puntos críticos del diagnóstico (Capítulo 9).

En relación con OE5 (Evaluación ex ante del aporte del modelo): Bajo supuestos declarados, el modelo proyecta un ahorro potencial de $162.500 por despacho ($2.437.500 mensuales por productor), atribuible exclusivamente al escenario de reducción de la pérdida poscosecha total declarada del 10 % al 5 %. La configuración factible reduciría los viajes semanales de 77 a 42 y evitaría unas 14,8 t de CO_2 al mes; en el transporte no se atribuye ahorro, porque la tarifa por canastilla no cambia y cualquier beneficio depende de una negociación por carga y recorrido. En la información, el aporte es cualitativo: habilita la trazabilidad del despacho (Capítulo 10).

Conclusión general: La implementación del modelo de coordinación logística propuesto requiere, antes que inversiones tecnológicas complejas, un cambio en la forma en que los actores de la cadena se coordinan y comparten información. La consolidación de cargas, el reporte estructurado de disponibilidad mediante WhatsApp Business y una hoja de cálculo compartida, el uso del refractómetro digital como filtro de calidad en origen y la estandarización del empaque son intervenciones de bajo costo que, iniciadas con un piloto entre productores cercanos y formalizadas si los resultados lo justifican, podrían mejorar la competitividad del sector piñero de Lebrija, Santander. La plataforma web, desarrollada como prototipo, constituye la etapa de consolidación del modelo; su aporte dependerá de que se incorpore de forma gradual, con capacitación a los actores y un diseño de fácil uso adaptado al nivel de escolaridad de los usuarios y a la conectividad de las veredas.

12.3. Recomendaciones

A partir del diagnóstico y de la evaluación ex ante, se plantean las siguientes recomendaciones por tipo de actor.

- **Para los productores:** Conformar un grupo piloto de productores cercanos, con reglas claras de reporte, programación, reparto de costos y seguimiento. Cuando el esquema demuestre resultados y confianza, constituir una asociación formal (estatutos y registro ante la Cámara de Comercio y la DIAN), que facilitaría ampliar el esquema y acceder a programas de Finagro, el MADR y la Gobernación de Santander; no es requisito para iniciar el piloto.

Adoptar el refractómetro digital como filtro de calidad en cosecha, estableciendo que ninguna piña con menos de 12 °Brix sea despachada, e implementar el sistema de coordinación C-01 (WhatsApp Business y Google Sheets) como primer paso de digitalización. Este último no exige inversión en licencias y puede adoptarse en dos a cuatro semanas con capacitación mínima.

- **Para los transportistas:** Participar en el esquema de recolección consolidada bajo una tarifa negociada que reconozca el mayor recorrido y el tiempo adicional de las paradas. Así, el menor número de servicios se compensa con viajes de mayor valor y carga completa, condición para que el esquema sea sostenible para este actor.
- **Para los comerciantes de la Central de Abastos:** Vincularse a los formularios digitales con base de datos compartida (C-02) para reportar la demanda prevista en campos estructurados y consultar la disponibilidad informada por los productores, para anticipar pedidos y planificar los despachos en conjunto. Establecer, además, criterios técnicos estandarizados de recepción basados en los grados Brix, para que los productores conozcan los requisitos de calidad.
- **Para las entidades de apoyo:** Articular los programas de asistencia técnica del ICA, la Gobernación de Santander y el MADR con los procesos de conformación asociativa, acompañando la implementación del modelo y la capacitación en las herramientas seleccionadas. Diseñar, desde el Banco Agrario y Finagro, líneas de crédito con tasas

preferenciales para la adquisición de instrumentos de medición, priorizando a los productores vinculados a esquemas de coordinación colaborativa.

- **Para futuras investigaciones:** Profundizar en la optimización de rutas mediante modelos de programación matemática que incorporen la georreferenciación de las fincas, los tiempos de cargue y las restricciones de capacidad vial, con el fin de determinar el trazado óptimo de cada ruta. Realizar una evaluación de impacto tras doce meses de implementación para contrastar los ahorros proyectados con los resultados reales. Validar en campo el prototipo de plataforma web con el grupo piloto de productores, evaluando su usabilidad según el perfil de escolaridad de los productores y definiendo cómo se financian su alojamiento y mantenimiento. Explorar la extensión del modelo a otras cadenas de frutas tropicales de la región.
- **Para la implementación:** Iniciar la implementación en la vereda La Aguada, que concentra el 38 % de los productores entrevistados y el 41,6 % de los 77 despachos semanales registrados, y cuyos predios permiten conformar rutas consolidadas sin desplazamiento entre veredas. Esa concentración reduce la complejidad de coordinación de la fase inicial y permite evaluar los resultados antes de extender el esquema a las demás veredas. Antes de arrancar, acordar con los transportistas la tarifa de la ruta consolidada y definir cómo se compensa al líder veredal, condiciones sin las cuales el esquema no es sostenible para todos los actores.

En cuanto al prototipo de plataforma web, se recomienda desplegarlo de forma gradual, una vez consolidada la coordinación con C-01 y C-02, y acompañarlo de un programa de capacitación dirigido a productores, líderes veredales, transportistas y comerciantes. La capacitación debería basarse en sesiones prácticas en campo, guías visuales breves y el acompañamiento del líder veredal como usuario de referencia. La herramienta debe mantener un diseño de fácil uso: formularios con pocos campos, lenguaje sencillo, íconos reconocibles,

acceso desde el celular y bajo consumo de datos, de modo que el nivel de escolaridad de los usuarios y la conectividad intermitente de las veredas no se conviertan en barreras de adopción. Asimismo, conviene habilitar un canal de soporte, recoger periódicamente la retroalimentación de los usuarios para ajustar la plataforma y medir su uso efectivo, por ejemplo con el porcentaje de despachos registrados y cerrados en ella, antes de sustituir el registro en la hoja de cálculo compartida.

Referencias

Al-Dairi, M., Pathare, P. B., Al-Yahyai, R., y Opara, U. L. (2022). Mechanical damage of fresh produce in postharvest transportation: Current status and future prospects. Trends in Food Science y Technology, 124, 195–207. https://doi.org/10.1016/j.tifs.2022.04.018

Alcaldía de Lebrija. (2023). Plan de desarrollo municipal de Lebrija 2020–2023: Lebrija, territorio de oportunidades. Alcaldía Municipal de Lebrija, Santander.

Aristizábal Rodríguez, C. A. (2013). ¿Puede la asociatividad contrarrestar la influencia que ejercen los intermediarios en los precios de los productos agrícolas cultivados por pequeños productores? Gestión y Región, (16), 41-58.

Buenhombre Vásquez, M. A., y Mariño Becerra, G. Y. (2022). Asociatividad como estrategia de productividad y competitividad del sector agrícola. Revista Venezolana de Gerencia, 27(98), 619–633. https://doi.org/10.52080/rvgluz.27.98.15

Cámara de Comercio de Bucaramanga. (s. f.). Compite 360 [Base de datos empresarial]. Recuperado el 15 de mayo de 2025, de https://www.camaradirecta.com/que-es-compite-360

Cárdenas Díaz, Y. S., y Royeth Angulo, M. K. (2020). Modelo de planeación colaborativa en la cadena de suministro de la piña del municipio de San Marcos, Sucre [Trabajo de grado, Corporación Universitaria del Caribe – CECAR]. Repositorio Institucional CECAR.

Carter, C. R., y Rogers, D. S. (2008). A framework of sustainable supply chain management: Moving toward new theory. International Journal of Physical Distribution y Logistics Management, 38(5), 360–387. https://doi.org/10.1108/09600030810882816

Cinelli, M., Kadziński, M., Gonzalez, M., y Słowiński, R. (2020). How to support the application of multiple criteria decision analysis? Let us start with a comprehensive taxonomy. *Omega, 96*, 102261. https://doi.org/10.1016/j.omega.2020.102261

Congreso de la República de Colombia. (2003, 26 de junio). Ley 811 de 2003, por medio de la cual se modifica la Ley 101 de 1993, se crean las organizaciones de cadenas en el sector agropecuario, pesquero, forestal, acuícola, las Sociedades Agrarias de Transformación, SAT, y se dictan otras disposiciones. Diario Oficial No. 45.236.

Council of Supply Chain Management Professionals. (2013). Supply chain management terms and glossary. CSCMP.

De Steur, H., Wesana, J., Dora, M. K., Pearce, D., y Gellynck, X. (2016). Applying Value Stream Mapping to reduce food losses and wastes in supply chains: A systematic review. *Waste Management, 58*, 359–368. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.08.025

Desclee, D., Sohinto, D., y Padonou, F. (2021). Sustainability assessment and agricultural supply chains: Evidence-based multidimensional analyses as tools for strategic decision-making—The case of the pineapple supply chain in Benin. Sustainability, 13(4), 2060. https://doi.org/10.3390/su13042060

Díaz Lizarazo, D. L., Galindo España, G. M., Correa, S. N., y Gómez, U. E. (2020). Análisis de la estructura económica y ambiental de los residuos del cultivo de la piña en una zona de Lebrija, Santander [Trabajo de grado, Universidad Autónoma de Bucaramanga]. Repositorio Institucional UNAB.

Díaz Lizarazo, J. A., Riaño Herrera, N. M., y Morales Velasco, S. (2020). Caracterización y perspectivas del cultivo de piña (Ananas comosus) en Colombia. Agrosavia.

Díaz Ramírez, L., Hurtado Bermúdez, J. J., y Jäger, M. (2022). Brechas tecnológicas de la cadena productiva de la piña en el Valle del Cauca y descripción del estado del arte. Universidad Nacional de Colombia.

Ding, P., y Syazwani, S. (2016). Physicochemical quality, antioxidant compounds and activity of MD-2 pineapple fruit at five ripening stages. *International Food Research Journal*, 23(2), 549–555. http://psasir.upm.edu.my/id/eprint/29351/1/(14).pdf

Elkington, J. (1997). Cannibals with forks: The triple bottom line of 21st century business. Capstone Publishing.

European Commission. (2023). Better regulation toolbox 2023. https://commission.europa.eu/law/law-making-process/planning-and-proposing-law/better-regulation/better-regulation-guidelines-and-toolbox_en

FAO. (1993). Codex Alimentarius: norma para la piña (Ananas comosus) fresca CXS 182-1993 (rev. 1999, enm. 2005 y 2011). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.

Flórez Martínez, D. H., González Cerón, S. P., Ruíz Ramírez, D. M., y Uribe Galvis, C. P. (2020). *Perspectivas tecnológicas y comerciales para el cultivo de piña en Colombia*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). https://doi.org/10.21930/agrosavia.analisis.7403503

Gámez-Albán, H. M., Guisson, R., y De Meyer, A. (2024). Optimizing the organization of the first mile in agri-food supply chains with a heterogeneous fleet using a mixed-integer linear model. Intelligent Systems with Applications, 23, 200426. https://doi.org/10.1016/j.iswa.2024.200426

Gao, Y., Wang, X., Yang, K., Ma, J., Jiang, L., y Luo, Q. (2025). A bi-level programming model for optimizing location, capacity, and pricing decisions of origin warehouses in an agricultural supply chain. Applied Mathematical Modelling, 145, 116145. https://doi.org/10.1016/j.apm.2025.116145

Gonçalves, H., Magalhães, V. S. M., Ferreira, L. M. D. F., y Arantes, A. (2024). Overcoming barriers to sustainable supply chain management in small and medium-sized enterprises: A multi-criteria decision-making approach. Sustainability, 16(2), 506. https://doi.org/10.3390/su16020506

Han, J., Zhang, M., Xiong, X., y Wang, Y. (2026). Optimizing multi-compartment vehicle routing in the first-mile logistics of fresh agricultural products using variable neighborhood search. Knowledge-Based Systems, 346, 116138.

Han, X., y Yang, H. (2025). Digital technologies in sustainable agricultural supply chain management: A systematic review and research agenda. Supply Chain Management: An International Journal, 30(1), 1–24. https://doi.org/10.1108/SCM-04-2024-0285

Handayati, Y., Simatupang, T. M., y Perdana, T. (2015). Agri-food supply chain coordination: The state-of-the-art and recent developments. Logistics Research, 8, 5. https://doi.org/10.1007/s12159-015-0125-4

IGAC. (2022). Caracterización socioeconómica del municipio de Lebrija, Santander. Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

IDEAM. (2016). Factores de emisión de los combustibles colombianos (3.ª ed.). Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. https://www.ideam.gov.co

John, R., y Singh, A. K. (2025). A DEMATEL approach for analysing the interdependence among the efficiency barriers in the agri-fresh produce supply chains. Supply Chain Analytics, 10, 100106. https://doi.org/10.1016/j.sca.2025.100106

Kmiecik, M. (2022). Logistics coordination based on inventory management and transportation planning by third-party logistics (3PL). Sustainability, 14(13), 8134. https://doi.org/10.3390/su14138134

Liu, H., y Osman, L. H. (2023). Factors influencing the application of blockchain technology in agricultural supply chain management: Systematic literature review and social network analysis. *LogForum, 19*(3), 361–373. https://doi.org/10.17270/J.LOG.2023.858

Lubag, M., Bonifacio, J., Tan, J. M., Concepcion, R., II, Mababangloob, G. R., Galang, J. G., y Maniquiz-Redillas, M. (2023). Diversified impacts of enabling a technology-intensified agricultural supply chain on the quality of life in hinterland communities. *Sustainability, 15*(17), 12809. https://doi.org/10.3390/su151712809

Majluf-Manzur, Á. M., González-Ramirez, R. G., Velasco-Paredes, R. A., y Villalobos, J. R. (2021). An operational planning model to support first mile logistics for small fresh-produce growers. En D. A. Rossit, F. Tohmé y G. Mejía Delgadillo (Eds.), Production Research. ICPR-Americas 2020 (Communications in Computer and Information Science, vol. 1408, pp. 205-219). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-76310-7_17

Matusiewicz, M. (2024). Shared logistics — A clash with reality: Results of a survey conducted on the Polish market of Logistics Service Providers. Transportation Research Procedia, 79, 60–67.

Parfenov, A., Shamina, L., Niu, J., y Yadykin, V. (2021). Transformation of distribution logistics management in the digitalization of the economy. Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity, 7(1), 58. https://doi.org/10.3390/joitmc7010058

Phuangsubsin, C., Jantakard, H., y Vinitpittayakul, K. (2024). Risk assessment of sustainable pineapple supply chain management. Thai Environmental Engineering Journal, 38(1), 1-11.

Ríos Rojas, L., Puentes Díaz, C. L., Trejos Arana, A. M., Ramos Villafañe, Y. P., Carabalí Muñoz, A., Gómez Paz, Y., y Saavedra, S. (2019). *Manual técnico para la producción de semilla de piña (Ananas comosus L. Merril) variedad MD2*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (AGROSAVIA). https://doi.org/10.21930/agrosavia.investigation.7403190

Shadkam, E., e Irannezhad, E. (2025). A comprehensive review of simulation optimization methods in agricultural supply chains and transition towards an agent-based intelligent digital framework for Agriculture 4.0. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 143, 109930. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.109930

Sengupta, U., y Kim, H. M. (2021). Meeting changing customer requirements in food and agriculture through the application of blockchain technology. Frontiers in Blockchain, 4, 613346. https://doi.org/10.3389/fbloc.2021.613346

Taşkıner, T., y Bilgen, B. (2021). Optimization models for harvest and production planning in agri-food supply chain: A systematic review. Logistics, 5(3), 52. https://doi.org/10.3390/logistics5030052

Tröger, K., Lelea, M. A., Hensel, O., y Kaufmann, B. (2020). Re-framing post-harvest losses through a situated analysis of the pineapple value chain in Uganda. Geoforum, 111, 48–61. https://doi.org/10.1016/j.geoforum.2020.02.017

UPME. (2015). Factores de emisión de la red eléctrica colombiana y del sector transporte. Unidad de Planeación Minero Energética.

UPRA. (2025). *Evaluaciones Agropecuarias Municipales (EVA) 2024: base agrícola 2024*. Unidad de Planificación Rural Agropecuaria.

Vargas Prieto, A., Fajardo Rodríguez, C. L., Romero Rodríguez, Y. E., y Nieves Forero, K. Y. (2019). La asociatividad para articular cadenas productivas en Colombia. El caso de los pequeños productores de papa criolla en Subachoque, Cundinamarca. Cooperativismo y Desarrollo, 27(2), 1–31. https://doi.org/10.16925/2382-4220.2019.02.10

Zgaya, H., y Hammadi, S. (2016). Logistics engineering. En H. Zgaya y S. Hammadi, Logistics engineering and health (pp. 1-53). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-1-78548-044-7.50001-4