

# Modelo de planificación táctica de cultivos bajo incertidumbre

## Tactical Crop planning model under uncertainty

DOI: <http://doi.org/10.17981/ingecuc.16.2.2020.20>

Artículo de Investigación Científica. Fecha de Recepción: 20/07/2020. Fecha de Aceptación: 25/09/2020.

**Leila Nayibe Ramírez Castañeda** 

Universidad Libre de Colombia. Bogotá, D.C. (Colombia)  
Leylan.ramirez@unilibre.edu.co

**Olga Lucía Pardo Beltrán** 

Universidad Libre de Colombia. Bogotá, D.C. (Colombia)  
olgal.pardob@unilibrebog.edu.co

Para citar este artículo:

L. Ramírez Castañeda & O. Prado Beltrán, “Modelo de planificación táctica de cultivos bajo incertidumbre”, vol. 16, no. 2, pp. 253–267. DOI: <http://doi.org/10.17981/ingecuc.16.2.2020.20>

### Resumen

**Introducción**— Actualmente la toma de decisiones es uno de los procesos más importantes dentro de la planificación de cultivos dadas las incertidumbres experimentadas por los agricultores en condiciones de campo abierto, esto hace necesario el desarrollo de modelos de planeación que incorporen estas incertidumbres como se presenta en la siguiente investigación.

**Objetivos**— Aplicar un modelo táctico para la optimización de la cadena de suministro en la producción de maracuyá para tres productores en el municipio de Suaza (Huila, Colombia) considerando tres escenarios probables para sustentar las decisiones de planificación, que sirva como herramienta de apoyo a la toma de decisiones en la planificación del cultivo.

**Metodología**— El modelado elegido es un programa estocástico bi-etapa donde las decisiones en la primera etapa se toman para satisfacer los resultados inciertos de la segunda etapa. El modelo propuesto, determina qué cantidad de hectáreas debe sembrar cada productor para minimizar los costos considerando el rendimiento, dejando el precio como la fuente de incertidumbre para la segunda etapa. Finalmente, se analiza la utilidad esperada bajo diferentes escenarios.

**Resultados**— Los resultados del modelo muestran que las estrategias de riesgo compartido a partir de la cooperación entre productores pueden lograr mayores utilidades en los diferentes escenarios y cumplir con las necesidades del mercado; en el escenario pesimista se puede lograr una utilidad de \$15 982 562.62.

**Conclusiones**— Aplicar modelos bajo incertidumbre permite obtener recomendaciones sobre procesos de planificación para tomar decisiones que se ajustan a un enfoque estocástico en comparación con los resultados obtenidos sin considerar la incertidumbre, y a su vez plantear estrategias colaborativas de gestión de finca. El modelo resultante muestra un punto de partida para establecer planes de producción más robustos que se ajusten a las necesidades de los productores, considerando la importancia de variables y parámetros aleatorios sobre las decisiones de plantación.

**Palabras clave**— Programación estocástica; planeación de cultivos; pasifloras; toma de decisiones; optimización bajo incertidumbre

### Abstract

**Introduction**— Currently, decision making is one of the most important processes in crop planning and the uncertainties experienced by fields in open field conditions. This is necessary to develop planning models that incorporate these uncertainties as presented in the next investigation.

**Objective**— To apply a tactical model for the optimization of the supply chain in the production of passion fruit for three producers in the municipality of Suaza (Huila, Colombia) considering three probable scenarios to support the planning decisions, to serve as a tool to support the making of decisions in crop planning.

**Methodology**— The chosen modeling is a stochastic bi-stage program where the decisions in the first stage are taken to satisfy the uncertain results of the second stage. The proposed model determines how many hectares each producer must plant to minimize costs considering yield, leaving the price as the source of uncertainty for the second stage. Finally, the expected utility is analyzed under different scenarios.

**Results**— The results of the model show that risk-sharing strategies based on cooperation between producers can achieve higher profits in different scenarios and meet market needs; in the pessimistic scenario a profit of \$15 982 562.62 can be achieved.

**Conclusions**— Applying models under uncertainty allow us to obtain recommendations on planning processes to make decisions that conform to a stochastic approach compared to the results obtained without considering uncertainty, and in turn propose collaborative farm management strategies. The resulting model shows a starting point to establish more robust production plans that adjust to the needs of producers, considering the importance of variables and random parameters on planting decisions.

**Keywords**— Stochastic programming; crop planning; passion fruit; decision making; optimization under uncertainty

## I. INTRODUCCIÓN

Para la planeación de la producción de la cadena de suministros de productos agrícolas frescos, se han utilizado herramientas de investigación de operaciones que buscan apoyar la toma de decisiones bajo un entorno de incertidumbre, dentro de ellas, se encuentra la programación estocástica, una herramienta que combina el paradigma de la programación lineal con la formulación de parámetros aleatorios [1].

La programación estocástica se está convirtiendo en una herramienta cada vez más utilizada para modelar decisiones bajo incertidumbre en la programación matemática [2]. Ésta consiste en optimizar un problema con parámetros inciertos que tienen o no una distribución de probabilidad conocida. Los modelos de programación estocástica tienen la ventaja de permitir gestionar los riesgos asociados con el rendimiento de la cadena de suministro [3], [4].

La toma de decisiones en la planificación agrícola presenta incertidumbres dada la naturaleza de las variables; los modelos de planeación de cultivos a menudo no adicionan parámetros estocásticos encontrados en distintos niveles de la cadena de suministro de productos frescos [5]. Estos parámetros aleatorios influyen significativamente en la planificación de la producción agrícola, lo que ha permitido el estudio de técnicas de optimización bajo incertidumbre que buscan entender el comportamiento de la naturaleza para minimizar el riesgo al que están expuestos los productores al momento de implementar las decisiones de planeación.

Dentro de las técnicas de optimización bajo incertidumbre, se encuentra la Programación Lineal Estocástica aplicada a problemas relacionados con la planeación de la producción, programación operativa, localización, agricultura, entre otros [6]. Donde los parámetros aleatorios son expresados bajo distribuciones de probabilidad.

Las técnicas de optimización relacionadas con la gestión agrícola han permitido responder a problemas complejos capturando el comportamiento de las variables aleatorias, ocasionado por condiciones meteorológicas poco predecibles. Entre las técnicas más utilizadas y de las que se hará énfasis para efectos del siguiente trabajo se encuentran la Programación Estocástica Bi-etapa TSP (Two-stage Stochastic Programming) propuestas en la década de 1950 [7].

La configuración de estos modelos permiten la solución del problema en dos etapas, que dependen de las decisiones que el agricultor toma en la primera etapa, con la información conocida de los datos aleatorios, que alimentan los parámetros para resolver las decisiones de la segunda etapa.

Es así que, algunos de los principales parámetros de interés para la toma de decisiones que se consideran en la planificación de producción de productos agrícolas frescos (frutas, verduras, hortalizas) son los precios del mercado, la demanda de los cultivos y su rendimiento. Estos factores estocásticos presentan importantes interacciones entre ellos; una de ellas es la formada por el rendimiento del cultivo y el precio de los productos [8], [9].

En consecuencia, las decisiones sobre las variables de la primera etapa (variables de control), se toman antes de conocer la realización de la variable aleatoria, es decir, decisiones que se toman antes de evidenciar la incertidumbre [2]. Para la segunda etapa, las decisiones sobre las variables de decisión (variables de estado o de recurso), se toman después de la realización de la incertidumbre [10], [11]. De acuerdo con este enfoque, los costos y recursos en la primera etapa son deterministas, dejando las variables de segunda etapa como las únicas funciones aleatorias [12].

Como resultado del modelo TSP, se obtienen las decisiones únicas de la primera etapa y un conjunto de reglas de decisión de recurso que determinan las decisiones para la segunda etapa en respuesta a cada parámetro incierto. El objetivo del TSP es minimizar la suma de los costos de la primera etapa los cuales son conocidos y minimizar el valor esperado de los costos de la segunda etapa [13], [14].

Continuamente, los productores de frutas se enfrentan a diferentes problemas de planificación, debido a incertidumbres que intervienen en los planes de crecimiento de los frutos. Dada la importancia para asegurar la cadena de suministros de alimentos y teniendo en cuenta la complejidad al planificar en condiciones de campo abierto, con anterioridad se han desarrollado modelos que capturan variables estocásticas, buscando soluciones que se adapten a las situaciones experimentadas por los agricultores [12]. Dado el comportamiento combinado de la oferta

con la demanda y la falta de recursos e información, los productores no han adoptado prácticas para aumentar la cantidad, la calidad de sus productos, la producción y los precios, estos varían debido a los cambios en el clima, además al deficiente sistema de información fuente de apoyo a las decisiones de producción [15].

En Colombia, se ha priorizado la producción frutícola dado el potencial exportador de algunas especies como las *Passifloras*, donde se identifica el maracuyá [16]. El Huila es el mayor productor de *Passifloras* en el país, el cultivo de maracuyá del departamento es muy apetecido en el mercado nacional por sus grados °Brix (°Bx) [17] encontrándose en los municipios de La Plata, Rivera y Suaza las principales zonas de plantación [18], [19].

El cultivo de *Passifloras* en el territorio nacional se caracteriza por ser semipermanente, lo que hace que la producción no sea constante durante todo el año ocasionando problemas en el abastecimiento del fruto, generando inestabilidad en el precio de venta al comercializador y al consumidor final. El precio es influenciado por diversos factores como la estacionalidad de las cosechas que determina la temporada de oferta [20].

La oferta de maracuyá en la región es constante durante todo el año y las épocas de cosecha varían de acuerdo a la época de siembra, sin embargo, hay factores que han generado brechas en la productividad del cultivo como las fluctuaciones de los precios durante el año y los bajos rendimientos [21].

Ante estos hechos, los procesos de planificación de cultivos es una necesidad permanente para mejorar la gestión de finca, con el fin de minimizar los riesgos económicos asociados. Por esta razón, el objetivo de esta investigación es entender los sistemas de producción con variables aleatorias a través del planeamiento de un modelo un modelo táctico estocástico, verificar la viabilidad de su aplicación a una muestra de productores de maracuyá localizados en el Huila (Colombia).

## II. ANTECEDENTES

El diagnóstico de la situación nacional enmarca temáticas del consumo, comportamiento de la producción y la oferta de las *Passifloras* con el fin de evaluar la dinámica de estas frutas a nivel interno [20].

Aunque existen diversas revisiones relacionadas con la gestión de la cadena de suministro agrícola en la literatura, el aspecto estocástico de la cadena de suministro agrícola solo se aborda tangencialmente después de 1993 [2].

Bajo este contexto, al realizar la búsqueda bibliográfica, se encontró que hacia el año 2008, se publicó un libro sobre el desarrollo de un marco de planificación para gestionar la cadena de suministro de productos agrícolas frescos desde la perspectiva de los productores, donde el objetivo principal es ayudar a los agricultores a tomar decisiones basadas en factores que no suelen considerar. La metodología utilizada, divide el problema en dos fases: táctica y operativa. El sistema de planificación integra un modelo de *Cadena de Suministro Analítico* que toma la información relevante para generar un plan de crecimiento, cosecha y distribución de productos en un ciclo de planificación. La solución particular se obtiene a través de la programación mixta entera y la programación estocástica aplicada a las decisiones agrícolas [8].

Un año más adelante, otros autores presentaron un modelo *Integrado de Planificación Táctica* para la producción y distribución de productos frescos [5]. El objetivo principal del modelo es maximizar los ingresos de un productor que tiene cierto control sobre las decisiones de logística asociadas con la distribución del cultivo. El modelo considera la perecibilidad de los cultivos de dos maneras, como una función de pérdida en su función objetivo y como una restricción para el almacenamiento de los productos. En dicha investigación, el modelo de *Programación Lineal Entera Mixta* es utilizado para su desarrollo.

Hacia el año 2010, fue llevado a cabo el XIV Congreso de Ingeniería de Organización, en el cual socializaron un modelo de *Optimización Estocástica* para planificar cadenas de suministros de productos de ciclo de vida corto, a través de la decisión de reservar la capacidad a contratar en los recursos de los proveedores antes de tener certeza del comportamiento de la demanda donde consideran los altos niveles de incertidumbre representados en forma de escenarios [22]. El objetivo de esta investigación es determinar el plan que maximice el beneficio de la cadena de suministro basado en dos momentos de decisión a lo largo del horizonte de planificación. El problema

se formula como un problema de programación estocástica en dos etapas la cual fue propuesta en años anteriores [7].

Un año después del congreso anterior, investigadores de la Universidad de Lérida, presentaron un modelo *Táctico Determinista* para planificar la producción y distribución de productos agrícolas frescos, el cual consiste en un modelo mixto de *Programación Entera* para la programación óptima de las operaciones de cosecha, con el objetivo de maximizar los ingresos de los agricultores [23].

Tras pasar un año, en el 2012, el Laboratorio de Logística Internacional y Mejora de la Productividad, de la Universidad Estatal de Arizona presenta la versión estocástica de dicho modelo, en el cual consideran incertidumbres como el clima y el comportamiento del mercado [12]. Este modelo incorpora las estimaciones estocásticas de precios y rendimientos que se integran mediante múltiples escenarios, donde el objetivo principal es desarrollar planes de plantación y distribución que sean robustos a los efectos inciertos de los mercados y el clima. Para su desarrollo, se utilizó un programa estocástico bi-etapa. Según las conclusiones de dicho trabajo, el modelo estocástico difiere significativamente de la versión determinística pues éste proporciona resultados que son más confiables, con importantes beneficios, convirtiéndose en una herramienta útil para los agricultores.

En los años siguientes se plantea un modelo de *Planificación Táctica* de la cadena de suministro de una planta de energía de biomasa forestal bajo la incertidumbre del suministro, basado en un modelo determinista previamente desarrollado para la optimización de dicha cadena [10]. El modelo incorpora la incertidumbre de la disponibilidad mensual de la biomasa de diferentes proveedores, en un modelo de programación estocástica de dos etapas con objetivo de maximizar el beneficio esperado de posibles escenarios de biomasa disponible; se incluye además en dicho estudio un modelo bi-objetivo para equilibrar el riesgo y el beneficio. Los autores concluyen como en investigaciones posteriores se podría dar énfasis en incorporar la incertidumbre en la calidad de la biomasa en el enfoque de modelado y, además, el objetivo económico utilizado en este estudio, los objetivos sociales y ambientales también podrían considerarse en trabajos futuros.

Al revisar la literatura sobre modelos de planificación, se encontró que hacia el 2015 se desarrolló un trabajo denominado: “Modelos de Investigación Operacional Aplicados a la Cadena de Suministro de Fruta Fresca” [24], en el que se hace una extensiva investigación de documentos científicos que incluyen modelos de investigación de operaciones para fruta fresca. Dentro de los estudios analizados, llama la atención un estudio en el que los autores extienden un modelo de *Programación Lineal Entera Mixta*, para un problema de planificación de la cosecha de uva para la producción de vino, a uno estocástico donde la productividad es considerada un parámetro incierto.

Un año después, en un intento de proporcionar un estado del arte sobre el uso reciente de metodologías de investigación de operaciones para el manejo de diferentes tipos de incertidumbre en la gestión eficiente de la cadena de suministro agrícola, se encontró que existen varios estudios en el que se hace uso de programación estocástica en dos etapas TSP [2]; en la [Tabla 1](#) se clasifican los trabajos más relevantes realizados a partir del año 2012.

**TABLA 1.** ESTUDIOS DONDE USAN TSP PARA HACER FRENTE A LA INCERTIDUMBRE EN AGRICULTURA.

Referencia	Naturaleza	Objetivo principal del estudio
Borodina et al. (2012).	Demanda de empleo, nivel de empleo rural, precios de mercado.	Apoyar la formulación de políticas sobre desarrollo agrícola sostenible en Ucrania bajo riesgos inherentes, información incompleta y recursos.
Huh and Lall (2013).	Clima, precio de mercado.	Resolviendo un problema de decisión a nivel de finca con el objetivo de asignar la tierra entre diferentes cultivos bajo diversos requerimientos de agua y los términos del contrato de los compradores.
Costa et al. (2014).	Demanda.	Estudiar un problema de rotación de cultivos vegetales con limitaciones ecológicas y de demanda.
Wiedenmann and Geldermann (2015).	Productividad de la tierra, precio, calidad de la cosecha.	Abordar el problema de planificación del suministro de un procesador de materias primas de linaza, considerando la disponibilidad estacional, la variación en la cantidad / calidad del cultivo y la inestabilidad del precio de mercado.

Fuente: Autores [2].

Ese mismo año, se desarrolla un modelo de planificación [25], que considera la demanda mediante la *Programación Estocástica* en dos etapas, en un contexto de cadena de suministro de vegetales frescos donde el objetivo principal es minimizar los costos de adquisición y satisfacer la demanda futura. Este modelo, determina qué proveedores deben elegirse para los contratos de producción, es muy flexible y se puede adaptar fácilmente a otros contextos financieros con características y restricciones similares.

Un año después se desarrolló un modelo de *Programación Estocástica* de dos etapas para la planificación táctica integral de las cadenas de suministro de uno de los mayores fabricantes de turbinas eólicas del mundo bajo la demanda e incertidumbre del rendimiento de los proveedores y tiempos de espera estocásticos [26]. Los aportes de esta investigación en el campo de la planeación se ven reflejados al desarrollar un nuevo modelo cuantitativo para la planificación integral de la cadena de suministro bajo la forma más general de incertidumbre del proveedor, el modelo se ajusta para aplicaciones en el mundo real de la fabricación de turbinas eólicas.

Finalmente, hacia el 2018 se propone un modelo de optimización para la planificación de los cultivos de caña de azúcar con el propósito de abastecer una planta de biocombustibles sujeta a diferentes aspectos que delimitan el sistema: condiciones climáticas de la zona de interés; la capacidad de la planta de producción; y por último, las fuentes de incertidumbre. El modelo involucra incertidumbre sobre el rendimiento del cultivo y la fecha de inicio del abastecimiento, la función objetivo del modelo es la maximización del Valor Presente Neto esperado de la utilidad operativa del sistema agrícola. El modelo es aplicado en el caso de estudio en el desarrollo de los cultivos para una nueva refinería en Colombia y los resultados permiten identificar aspectos claves en la planificación de actividades agrícolas [27]-[28]. Se propone un modelo *Estocástico* de dos etapas, donde las decisiones de primera etapa corresponden a la programación de siembra y cosecha, así como, los planes de adquisición de tierras. La segunda etapa corresponde a las decisiones luego de la realización de las variables aleatorias.

### III. METODOLOGÍA

Dado este panorama, con el fin de optimizar la cadena de suministro en las áreas de producción del maracuyá, se realizará el estudio de caso para 3 productores ubicados en el municipio de Suaza (Colombia), con el objetivo de mejorar el proceso de toma de decisiones en la planificación agrícola bajo incertidumbre, que le permita a cada productor decidir sobre la cantidad a plantar del cultivo, el momento de la siembra y la cosecha.

Se propone la aplicación de un modelo de planeación táctica, que incorpore variables aleatorias relacionadas con el clima y el comportamiento del mercado, que capture la incertidumbre sobre el precio y el rendimiento del cultivo para planificar su producción, que sirva como herramienta de apoyo para tomar decisiones tácticas que le permitan al agricultor maximizar ingresos o minimizar riesgos de pérdida.

Para la construcción del mismo se busca utilizar un Programa Estocástico en dos etapas, en donde las decisiones que se toman en la primera etapa son la entrada para satisfacer los resultados inciertos de la segunda etapa. Se analizaron datos históricos sobre precios, rendimientos y costos de producción encontrados en la Red de Información y Comunicación Estratégica del Sector Agropecuario-AGRONET, la Corporación de Abastos de Bogotá S.A.-CORABASTOS [29] y en las Evaluaciones Agropecuarias Municipales-EVA del departamento [30], además de información climatológica aportada por el IDEAM que es imprescindible para su desarrollo y aplicación.

El uso de un modelo de planeación en dos etapas es conveniente para esta investigación, debido a la posibilidad de un análisis acotado y detallado de algunas variables del sistema, que al aumentar puede convertirse en un proceso complejo además permite analizar las fuentes de incertidumbre como su efecto sobre las decisiones óptimas, también permite discretizar el tiempo entre la etapa de siembra y la etapa de cosecha, donde las decisiones de plantación (siembra) deben tomarse antes de la fase de cosecha. Según el enfoque en dos etapas, la información de la cual dispone el productor en la primera etapa, se relaciona con restricciones de siembra y costos de producción. Para la segunda etapa se dispone de información sobre la distribución aleatoria de los precios, rendimientos de los cultivos.

Para el desarrollo del modelo de planeación agrícola aplicado en este caso de estudio, se aborda el problema clásico del agricultor [3], donde se busca tomar las mejores decisiones acerca de la cantidad de hectáreas de tierra a cultivar para tres productores de maracuyá, teniendo en cuenta la inestabilidad del rendimiento y el precio influenciados por las condiciones meteorológicas.

El modelo de planeación planteado integro dos etapas, en el que las decisiones en cada etapa dependen del rendimiento incierto de los cultivos y de la distribución aleatoria de los precios. La función objetivo busca maximizar la utilidad total de los productores, la cual está sujeta a estos parámetros aleatorios incluyendo los costos de producción.

A continuación, se presenta un modelo de programación estocástica bi-etapa para la planificación táctica de producción de maracuyá para tres productores del municipio de Suaza (Huila).

#### A. Identificación de parámetros y variables de decisión para la cadena productiva de maracuyá

Para la formulación del modelo de la presente investigación, se considera información relacionada con parámetros y variables de carácter aleatorio correspondientes al análisis de tres sistemas productivos de maracuyá ubicados en el municipio de Suaza en el Huila (Colombia).

Para el caso de estudio, cada agricultor busca determinar el área de siembra para el cultivo de maracuyá, en un horizonte de planeación de mediano plazo que involucre 4 periodos de planificación (siembra, prefloración, floración, cosecha), el modelo se apoya en los resultados obtenidos en la formulación del modelo de planeación desarrollado por [7]. La definición de cada una de las variables de decisión y parámetros utilizados se describen a continuación.

#### B. Variables y parámetros utilizados en el modelo de planeación

##### 1) Índices y Conjuntos

$p \in P$	:	Productores disponibles para la siembra.
$T \in T$	:	Periodos de planificación.
$s \in SC$	:	Escenarios.

##### 2) Variables de decisión

$Plant_p$	:	Área para sembrar por el productor $p$ . (ha).
$Yield_p^s$	:	Rendimiento del cultivo del productor $p$ , en el escenario $s$ .

##### 3) Parámetros

$Y_t$	:	1 si el cultivo se siembra en el periodo $t$ , 0 en caso contrario.
$pr^s$	:	Probabilidad estimada de escenario $s$ .
$Q_t^s$	:	Ingresos previstos de la segunda etapa del escenario $s$ en el periodo $t$ .
$YieldDis_{pt}$	:	Distribución del rendimiento del cultivo en el periodo $t$ para el productor $p$ .
$Cplant_{pt}$	:	Costo por hectárea de producción del cultivo sembrado por el productor $p$ en el periodo $t$ .
$Clabor_{pt}$	:	Costo de los trabajadores estacionales contratados por el productor $p$ en el periodo $t$ (\$/periodo/ha).
$Ctemp_{pt}$	:	Costo de un jornalero (hombre/día/ha) del productor $p$ en el periodo $t$ .
$Cfert_{pt}$	:	Costo de fertilizante del productor $p$ en el periodo $t$ (\$/ha).
$CRiego_{pt}$	:	Costo de regar del productor $p$ en el periodo $t$ (\$/m <sup>3</sup> ).
$LA_p$	:	Terreno (área) disponible del productor $p$ .
$InvCP_p$	:	Cantidad de inversión disponible para la producción del productor $p$ .
$InvCL_p$	:	Cantidad de inversión disponible para la contratación de trabajadores para el productor $p$ .
$InvCTem_p$	:	Cantidad de inversión disponible para la contratación de un jornalero para el productor $p$ .
$InvCfert_p$	:	Cantidad de inversión disponible para los fertilizantes por el productor $p$ .
$InvRiego_p$	:	Cantidad de inversión disponible para riego del cultivo por el productor $p$ .

- $Water_{pt}$  : Necesidades de agua para el cultivo en metros cúbicos ( $m^3$ ) para el productor  $p$ , en el periodo  $t$ .
- $W_p$  : Cantidad de agua disponible para el productor  $p$ .
- $Min_p$  : Cantidad de área mínima para sembrar por el productor  $p$ , en hectáreas (ha).
- $Max_p$  : Cantidad de área máxima para sembrar por el productor  $p$ , en hectáreas (ha).
- $Price_{stp}$  : Precio del cultivo sembrado por el productor  $p$ , en el periodo  $t$ , en el escenario  $s$ .
- $MinYield_{sp}$  : Rendimiento mínimo esperado del cultivo del productor  $p$ , en en el escenario  $s$ .
- $MaxYield_{sp}$  : Rendimiento máximo esperado del cultivo del productor  $p$ , en en el escenario  $s$ .
- $ProducTotal$ : Producción total esperada de los cultivos para satisfacer el mercado.

### C. Desarrollo y aplicación de programación matemática

El modelo estocástico de dos etapas desarrollado en esta investigación, describe las decisiones que se deben tomar en la primera etapa que abarcan las decisiones del periodo de siembra. La información que se introduce en la primera etapa del modelo es determinista como los costos y los recursos necesarios para el desarrollo del cultivo, mientras que para la segunda etapa la información es estocástica donde se introducen datos aleatorios como los rendimientos y los precios para el maracuyá, que afectan los periodos de prefloración, floración y cosecha representados en escenarios  $s$ .

El modelo tiene la siguiente estructura (1):

$$Max z = \left[ \sum_s pr^s \sum_{ts} Q_t^s - \sum_{tp} Plant_p Cplant_{pt} - \sum_{tp} Plant_p Ctemp_{pt} \right. \\ \left. - \sum_{tp} Water_{pt} CRiego_{pt} - \sum_{tp} Plant_p Clabor_{pt} - \sum_{tp} Plant_p Cfert_{pt} \right] \quad (1)$$

El objetivo del modelo (1) es maximizar las utilidades de los agricultores que se obtienen de los ingresos esperados de la segunda etapa menos los costos totales de la primera etapa, las decisiones de plantación están sujetas a restricciones de siembra las cuales se describen a continuación.

#### 1) Primera Etapa

La primera restricción (2) estableció que el productor no puede disponer de más área para plantar de la que tiene, las restricciones (3), (4), (5), (6) y (7) limitan que el productor gaste más dinero del que tiene para invertir, la restricción (8) verifica que se satisfacen requerimientos hídricos para el cultivo, para la elaboración de esta restricción se hizo uso del programa informático Cropwat de la FAO, para calcular las necesidades de agua del cultivo buscando mejorar la eficiencia en el uso del recurso hídrico. La restricción (9) determina una cantidad mínima y máxima de hectáreas para sembrar el fruto, la décima restricción (10) es la ecuación para establecer el valor de los ingresos previstos de la segunda etapa reemplazado en (1).

$$Plant_p \leq LA_p \quad \forall P \in p \quad (2)$$

$$\sum_t^T Cplant_{pt} Plant_p \leq InvCP_p \quad \forall P \in p \quad (3)$$

$$\sum_t^T Clabor_{pt} Plant_p \leq InvCL_p \quad \forall P \in p \quad (4)$$

$$\sum_t^T Ctemp_{pt} Plant_p \leq InvCTem_p \quad \forall P \in p \quad (5)$$

$$\sum_t^T Cfert_{pt} Plant_p \leq InvCfert_p \quad \forall P \in p \quad (6)$$

$$\sum_t^T CRiego_{pt} Plant_p \leq InvRiego_p \quad \forall P \in p \quad (7)$$

$$\sum_t^T Water_{pt} \leq W_p \quad \forall P \in p \quad (8)$$

$$Min_p \leq Plant_p \leq Max_p \quad \forall P \in p \quad (9)$$

## 2) Segunda Etapa

$$Q_t^s = \max \left[ \sum_{spt} pr_s (Price_{stp} Yield_p^s Plant_p) \right] \quad (10)$$

$$Yield_p^s = \sum_t Y_t YieldDis_{pt} \quad \forall P \in p, \forall SC \in s \quad (11)$$

$$\sum_p Plant_p Yield_p^s = ProducTotal \quad \forall SC \in s \quad (12)$$

$$MinYield_{sp} \leq Plant_p Yield_p^s \leq MaxYield_{sp} \quad \forall P \in p, \forall SC \in s \quad (13)$$

Los parámetros aleatorios en la segunda etapa fueron los precios y los rendimientos esperados de los cultivos, para este caso, la restricción (11) determina el rendimiento del productor durante toda la cosecha, la restricción (12) establece que el rendimiento debe cumplir con la demanda del mercado y la restricción (13) determina que hay una cantidad mínima y máxima a producir del fruto por hectárea, en los diferentes escenarios de análisis.

La herramienta de análisis para llevar a cabo la solución de la programación estocástica aplicada, en esta investigación fue a través de métodos exactos usando Microsoft Excel. Los escenarios requeridos para incorporar al modelo fueron creados a partir de distribuciones de probabilidad derivadas del comportamiento real de los precios y los rendimientos de los cultivos como se mencionó en el apartado anterior.

### D. Establecimiento de los escenarios de evaluación de las alternativas posibles para la ejecución del modelo

Los datos analizados correspondieron a los precios mensuales del maracuyá (\$/kg) para el año 2015 y los rendimientos anuales del cultivo en el municipio de Suaza, Huila (Kg/ha) del periodo comprendido entre 2008-2015. La información sobre precios fue tomada de la Corporación de Abastos de Bogotá S.A.-CORABASTOS [29], mientras que la información sobre los rendimientos fue aportada por la Gobernación del Huila por medio de las Evaluaciones Agropecuarias Municipales del departamento, el horizonte temporal seleccionado para el análisis fue seleccionado a los criterios de calidad y completitud de la información disponible.

Para el establecimiento de los escenarios, se hace uso del software Arena [31] el cual permite estimar las distribuciones de probabilidad para los precios y los rendimientos del cultivo.

A partir de la información procesada se estimaron tres escenarios probables (Optimista, Medio, Pesimista), utilizando los datos aleatorios generados por el software Arena. Las soluciones encontradas pueden ser consideradas como subóptimas debido a que se obtienen de aproximaciones de distribuciones de probabilidad.



## IV. RESULTADOS

Los resultados obtenidos se desarrollaron bajo la siguiente estructura, la definición de los parámetros aleatorios y propuesta de escenarios. Finalmente, la explicación de los resultados obtenidos del modelo táctico lineal estocástico bi-etapa.

## A. Definición de parámetros estocásticos y propuesta de escenarios

Del análisis estadístico del conjunto de datos seleccionados de precios y rendimiento, se utilizaron pruebas de bondad de ajuste Kolmogorov-Smirnov. Se generaron 100 aleatorios para cada parámetro de acuerdo a la función de distribución de probabilidad continua Triangular y Exponencial, que adquieren el mejor ajuste comparadas con otras funciones de distribución de probabilidad analizadas. Los resultados obtenidos se muestran en la [Tabla 2](#).

TABLA 2. DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDAD ESTIMADOS PARA PRECIOS Y RENDIMIENTOS (2008-2015).

Datos analizados (Parámetros del modelo)	Distribución de probabilidad	Expresión	Parámetros estadísticos	Test de prueba Kolmogorov-Smirnov	Error cuadrático
Precios (\$/Kg)	Triangular	TRIA(1.22e+003, 2.42e+003, 3.89e+003)	Media: Desviación estándar:	p-value > 0.15	0.005549
Rendimientos (kg/ha)	Exponencial	1.5e+004 + EXPO(1.31e+003)	Media: Desviación estándar	p-value > 0.15	0.007969

Fuente: [31].

El histograma del conglomerado de precios muestra un pico en el rango de \$2 286.6 a \$2 554.5, la información tratada tiene una dispersión en el intervalo de \$1 215 a \$3 894 (\$/kg), no se observan datos atípicos muy alejados de los datos. El histograma muestra una leve asimetría central natural de la variable. Sin embargo la dispersión de la información es alta lo que indica su naturaleza aleatoria y quizás relacionada con las temporadas de cosecha del cultivo ([Fig. 1](#)).

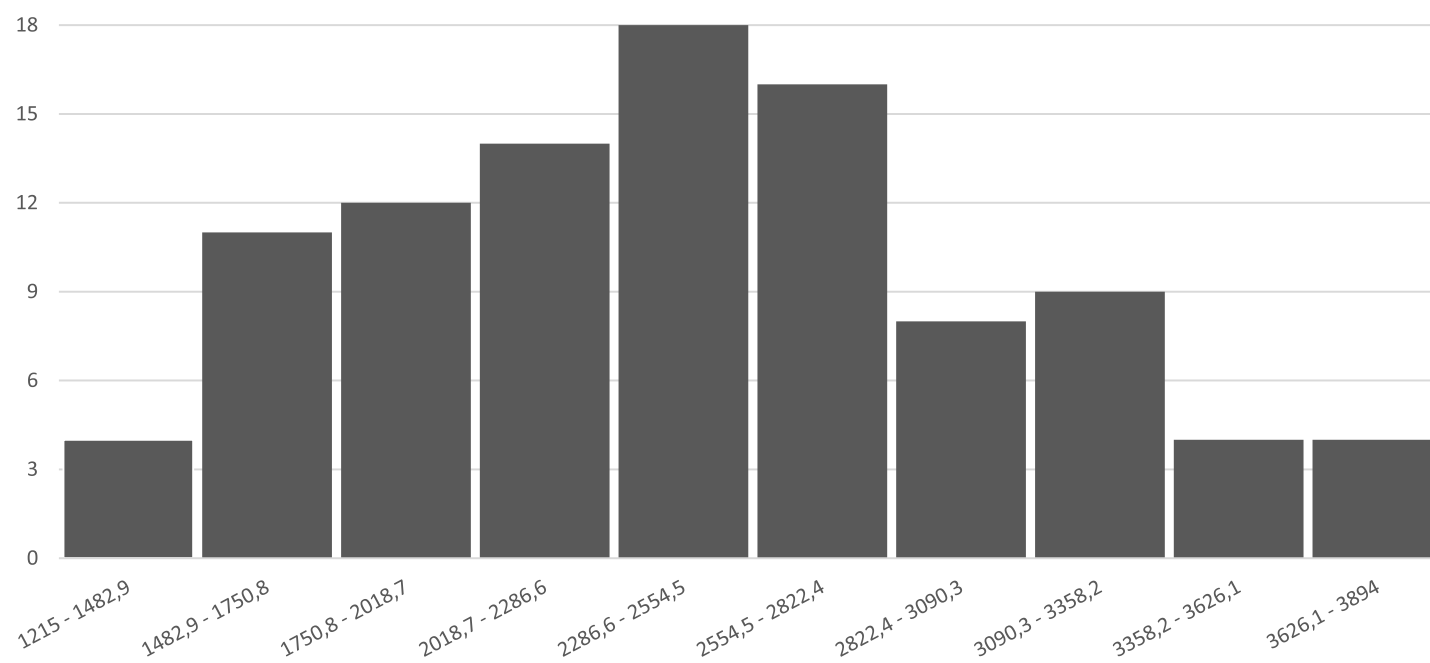


Fig. 1. Histograma de Precios Mensual (2015).

Fuente: [29].

El histograma de rendimientos tiene un pico en el rango 15 000 a 15 556.1 kg/ha que se presenta al inicio, también se puede observar datos atípicos en el rango 20 004.9 a 20 561 kg/ha a través de una barra aislada a un extremo. Los datos muestran asimetría hacia la derecha, este comportamiento sugiere que el rendimiento del cultivo de maracuyá está alrededor de 15 000 a 16 112.2 kg/ha y muy pocos productores alcanzan esta capacidad por encima de 20 561 kg/ha, que se asocia a las prácticas culturales de producción y el desarrollo tecnológico de los sistemas agrícolas bajo análisis ([Fig. 2](#)).

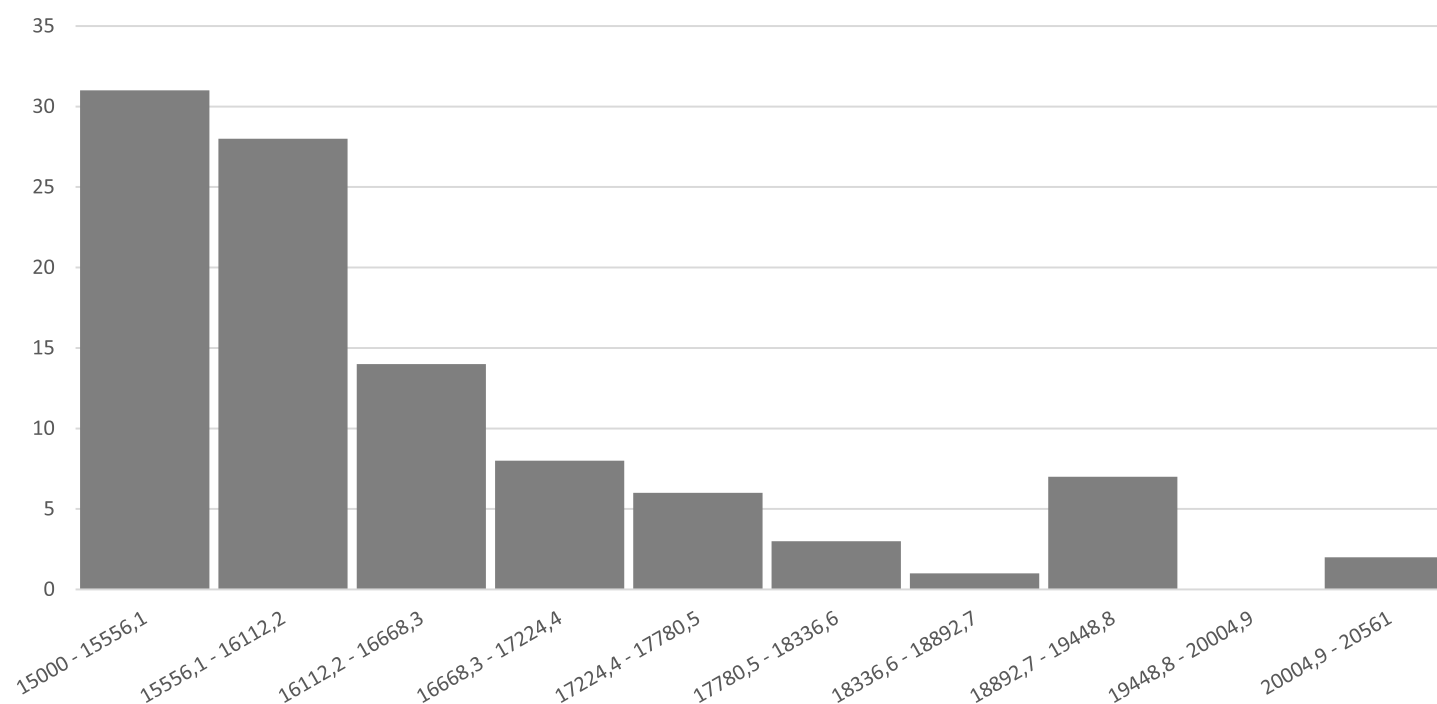


Fig. 2. Histograma de Rendimientos (2008-2015).  
Fuente: [30].

Para la construcción de escenarios, se analiza correlación entre los parámetros aleatorios para estimar la relación lineal entre las dos variables, esto permite establecer la fuerza y dirección que indica como estas variables experimentan relaciones causales, para el caso de estudio, se aplicó un modelo estadístico de Regresión Lineal y Regresión Exponencial como se observa en la Fig. 3.

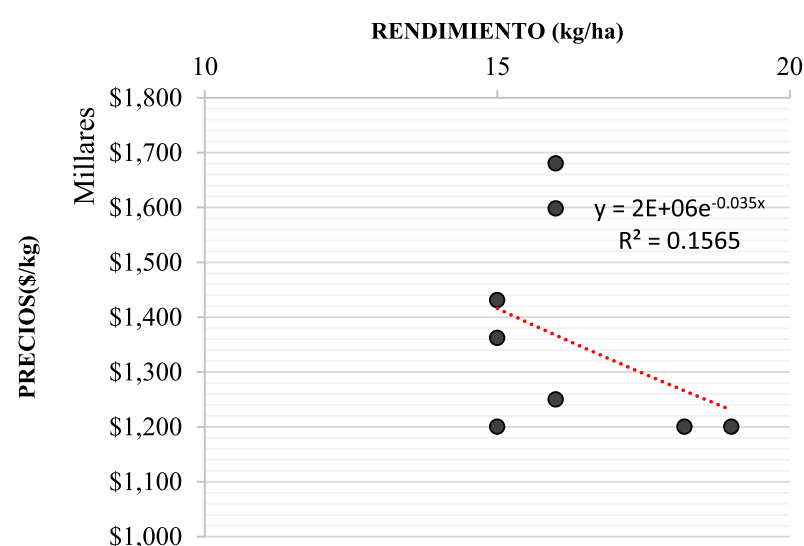


Fig. 3. Regresión Exponencial para Precios y Rendimientos.  
Fuente: Autores.

Según los resultados, la relación entre los parámetros analizados evidencia una correlación negativa. El modelo estadístico con mayor ajuste correspondió a la Regresión Exponencial con un  $R^2$  de 0.1565 comparado con la Regresión Lineal con un  $R^2$  de 0.1394. Esto indica una relación negativa moderada, ya que a medida que aumenta el rendimiento el precio disminuye. Esta relación negativa afirma el modelo económico sobre la ley de oferta y demanda, donde la interacción de las dos variables influyen en el precio del mercado. A partir de esta relación, se construyeron tres escenarios elaborados a partir de los aleatorios generados de las funciones de distribución de probabilidad para los parámetros precios y rendimientos.

#### B. Resultados del modelo táctico de planificación de cultivos bi-etapa

Los resultados obtenidos del modelo estocástico bi-etapa desarrollado para cada uno de los productores de maracuyá fue resuelto por el método simplex.

En esta investigación, se hace un análisis del peor escenario, donde los resultados logrados permiten entender cómo se estima el beneficio esperado frente al nivel de rechazo al riesgo (aversión al riesgo). La curva de pérdida de beneficio esperado, se explica cuando disminuyen los beneficios en el escenario pesimista. En la Fig. 4 se comparan las decisiones que los productores pueden tomar contando con información perfecta (línea azul) y sin la información perfecta (línea naranja). Esto quiere decir que optar por un enfoque donde se considera la incertidumbre permite aumentar las utilidades, dada la posibilidad de contar con información perfecta.

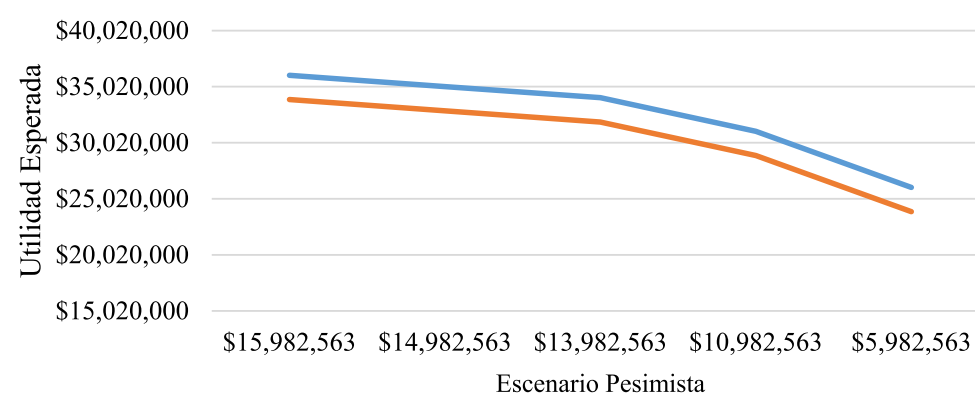


Fig. 4. Curva de Pérdida de Beneficio Esperado.  
Fuente: Autores.

Al analizar las soluciones de cada escenario para el caso de estudio, se observa que, cuando se presentan eventos naturales que afectan el rendimiento de los cultivos, la solución estocástica permite que los productores logren disminuir riesgos en la toma de decisiones. En el caso que los agricultores seleccionen cualquier solución por escenarios sin contar con información futura (perfecta), los resultados pueden ser sensibles dada la presencia del riesgo, mientras que si consideran la incertidumbre hay estabilidad en la solución (Fig. 5).

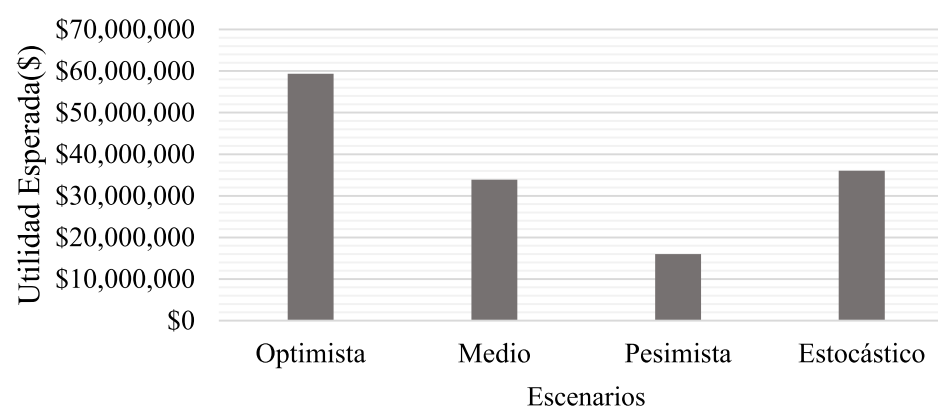


Fig. 5. Comparación de la Utilidad generada por cada Escenario con la Solución Estocástica (en millones de pesos).  
Fuente: Autores.

Además, para el caso de estudio, el dinero que los agricultores estarían dispuestos a pagar para obtener la información perfecta sobre precios y rendimientos futuros conocido como el valor esperado de la información perfecta EVPI es de \$363 996.

Al ejecutar el modelo en cada escenario, se encuentra que las utilidades de cada productor varían dependiendo del área disponible para la siembra, de la variabilidad de los precios y de los rendimientos. La interpretación de los resultados, con base en la información alcanzada para cada escenario permite hacer las siguientes estimaciones (Tabla 3).

TABLA 3. UTILIDADES GENERADAS CONSIDERANDO TRES ESCENARIOS PROBABLES

Productores	Rendimientos (t/ha)	Utilidades (\$)		
		Escenario Pesimista	Escenario Medio	Escenario Optimista
1	16 783	5 924 936	13 854 339	23 984 714
2	16 371	1 096 779	6 358 506	12 340 347
3	18 833	8 960 847	13 661 563	23 016 717

Fuente: Autores.

Para finalizar, en la [Tabla 4](#) se evidencian las soluciones de primera etapa para el modelo, que permite calcular la cantidad de área a sembrar para cada uno de los productores en cada uno de los escenarios donde las variables aleatorias rendimiento y precio tiene influencia en las decisiones, para un escenario pesimista los productores se propone que se siembre un área promedio de 0.3766 ha, para el escenario optimista 1 2266 ha, mientras que en la solución robusta obtenida por la probabilidad de que todos los escenarios pueden ocurrir con la misma probabilidad de 0.76 ha. También se puede observar que el productor 2 tiene mayor riesgo de pérdida comparado con los otros productores, lo que puede deberse a su capacidad y costos de producción.

**TABLA 4.** ÁREAS RECOMENDADAS PARA LA SIEMBRA DE MARACUYÁ (HA).

Productores	Escenario Pesimista	Escenario Medio	Escenario Optimista	Estocástico
1	0.40	0.74	1.24	0.78
2	0.26	0.54	0.94	0.57
3	0.47	0.87	1.50	0.93

Fuente: Autores.

El modelo de planificación táctico de cultivos bajo incertidumbre desarrollado y aplicado permite establecer el comportamiento de las utilidades esperadas de los productores bajo diferentes escenarios, así como la estimación del rendimiento esperado en cada una de los periodos del cultivo y cantidad de área a sembrar, generando un análisis de sensibilidad frente al riesgo de cada uno de los productores en relación con sus recursos disponibles, el aumento del rendimiento es proporcional al aumento de la utilidad, el área no tiene mucha influencia en este aspecto ya que los costos de producción están relacionados con el área a sembrar. Además, la optimización de estos recursos puede traer beneficios significativos, por ejemplo un aumento del rendimiento en 2.462 kg/ha puede incrementar la utilidad en \$7 864 068.00 cuando se contrasta las estimaciones del productor 2 y 3 en el escenario pesimista. Esta apreciación permite a los tomadores de decisión establecer como reconocer un sistema cooperativo, para alcanzar mejores beneficios económicos con la transferencia de mejores prácticas entre productores.

## V. DISCUSIÓN

Por otro lado al cotejar las deducciones del modelo planteado con los construidos por otros autores, se puede decir que el análisis detallado de la fase de producción no es patrón continuo ya que los cultivos tienen particularidades fenológicas y geográficas que hacen difícil su comparación y limitan el progreso en esta área de conocimiento. El control de la producción, con sistemas homogéneos definidos como productores con las mismas prácticas de siembra, biotecnología y posición geográfica facilita la minimización de la varianza en las derivaciones del rendimiento del cultivo. En el caso de la investigación [5], la discusión se centra en el cultivo del tomate y el modelo se cimienta bajo el supuesto de la homogeneidad de los productores ya que estos son parte de un proceso agroindustrial posterior, lo que hace que el modelo se ajuste en el abastecimiento y en seguida a la gestión de la cadena de suministro. Esto difiere en la propuesta planteada, donde la agroindustria es incipiente, al mismo tiempo se considera aspectos relevantes como las diferentes etapas del cultivo, la producción primaria y la heterogeneidad de los sistemas de producción explícitos en el caso de estudio. Es así que, con el desarrollo de este modelo, es posible encontrar una solución para cada escenario probable de la relación entre el precio y el rendimiento donde los productores podrán minimizar el riesgo al que se enfrentan al planificar en condiciones de incertidumbre, buscando maximizar los ingresos esperados, desarrollando estrategias colaborativas para aumentar la resiliencia de los cultivos y la homogeneidad de los sistemas productivos, que permitirán el alcance de mercados objetivo con esfuerzos conjuntos. El modelo planteado, puede ser tomado como base para futuras investigaciones involucrando otros parámetros buscando expandir el modelo con la adición de nuevas decisiones que podrían aumentar las ventajas de usar esta herramienta, como la inclusión de la influencia de la calidad de los productos agrícolas y su dependencia con los escenarios de cambio climático, que logran reducir la capacidad de producción y poner en riesgo la seguridad alimentaria. El desarrollo y la aplicación del modelo en este estudio de caso muestra un punto de partida para que los productores de maracuyá del municipio establezcan planes de producción que se ajusten a sus necesidades, considerando la importancia de la incidencia de

variables y parámetros aleatorios como el rendimiento y el precio sobre las decisiones de plantación, así como la trazabilidad de los cultivos, aparte permite un apoyo a la toma de decisiones futuras y a las decisiones de gestión en el mediano plazo.

## VI. CONCLUSIONES

El modelo resultante que considera la naturaleza estocástica de los parámetros en la planificación agrícola proporciona resultados confiables y estables en presencia del riesgo, el cual puede convertirse en una herramienta de apoyo en la toma de decisiones permitiendo calcular el área de siembra, estimar el rendimiento esperado. Igualmente, planificar bajo los escenarios de rendimiento y precio para estimar su efecto sobre los beneficios económicos esperados por los agricultores. En consecuencia, la ventaja del análisis de la incertidumbre con escenarios, permite que los productores tomen decisiones basadas en su tolerancia al riesgo, encontrando soluciones tácticas robustas que se adaptan a las diferentes situaciones que puedan experimentar, estos sistemas de producción. Los resultados muestran que al aplicar el modelo bajo condiciones de incertidumbre se alcanza el área de siembra óptima y el rendimiento esperado para cada una de las temporadas fisiológicas del cultivo como siembra, prefloración floración y cosecha. Este alcance detallado aprueba que las recomendaciones de planificación, aseguren un análisis del efecto de la incertidumbre del precio y rendimiento a una escala mensual durante el inicio hasta el desarrollo del cultivo.

El modelo de planificación de cultivos bajo incertidumbre presentado es una aproximación viable para cultivos tropicales, donde los sistemas geográficos, climáticos, productivos y los comportamientos fisiológicos de los cultivos son diversos, lo que aumenta la incertidumbre, en la toma de decisiones en comparación con posiciones geográficas subtropicales donde las condiciones climáticas, fisiológicas de los cultivos y producción tienen una relativa estabilidad. Las estrategias de producción colaborativas pueden ser una solución al crecimiento del sector agrícola en el futuro de los países en desarrollo por que permiten asegurar la demanda de los mercados, homogenizar los sistemas de producción, compartir el riesgo, lograr de forma más efectiva la transferencia de conocimiento y biotecnología, a través del trazado de metas esperadas en el proceso de planificación y el seguimiento de su alcance. El modelo puede ser aprovechado para el desarrollo de herramientas computacionales más robustas que permitan capturar la información de más productores, y es la base para la construcción de sistemas de información para el monitoreo y planificación de actividades agrícolas de campo en tiempo real.

## FINANCIAMIENTO

El proyecto de investigación se realizó con recursos de la Universidad Libre a través de la convocatoria interna de proyectos de 2016-2018.

## AGRADECIMIENTOS

A la Corporación Cepass, Centro de Desarrollo Tecnológico de la cadena de las pasiflora, por su apoyo en la consecución de información y validación de los resultados obtenidos en la investigación.

## REFERENCIAS

- [1] J. M. Bru, R. Poler & F. Lario, "Modelo y Métodos para la Planificación de la Producción de la Cadena de Suministro bajo Incertidumbre: Una introducción al Estado del Arte," presentado *II Conf Ing Org*, ADINGOR, Vigo, ES, 5-6 Sept. 2002. Disponible en <http://adingor.es/congresos/web/articulo/detalle/a/1495>
- [2] V. Borodin, J. Bourtembourg, F. Hnaien & N. Labadie, "Handling uncertainty in agricultural supply chain management: A state of the art," *Eur J Oper Res*, vol. 254, no. 2, pp. 348–359, Oct. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.03.057>
- [3] J. R. Birge y F. Louveaux, *Introduction to Stochastic Programming*. NY, USA: Springer, 1997.
- [4] D. Bertsimas y S. Melvyn, "Robust discrete optimization and network flows," *Math Program*, vol. 98, pp. 49–71, Sept. 2003. <https://doi.org/10.1007/s10107-003-0396-4>
- [5] O. Ahumada & J. R. Villalobos, "Application of planning models in the agri-food supply chain: A review," *Eur J Oper Res*, vol. 196, no. 1, pp. 1–20, Jul. 2009. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2008.02.014>
- [6] N. V. Sahinidis, "Optimization under uncertainty: state-of-the-art and opportunities," *Comput Chem Eng*, vol. 28, no. 6–7, pp. 971–983, Jun. 2004. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2003.09.017>
- [7] G. B. Dantzig, "Linear Programming under Uncertainty," *Manage Sci*, vol. 1, no. 3, pp. 197–206, 1955. <https://doi.org/10.1287/mnsc.1040.0261>
- [8] O. Valenzuela, *Models for Planning the Supply Chain of Agricultural Perishable Products*. Tempe, USA: ProQuest LLC, 2008.

- [9] L. N. Ramírez, S. L. Meneses & J. I. Campos, *Gestión de Operaciones en la cadena de alimentos*. Bo, CO: Unilibre, 2018. <https://doi.org/10.18041/978-958-5466-46-3>
- [10] N. Shabani, T. Sowlati, M. Ouhimmou y M. Rönnqvist, “Tactical supply chain planning for a forest biomass power plant under supply uncertainty,” *Energy*, vol. 78, no. C, pp. 346–355, Dec. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.10.019>
- [11] V. Albornoz y C. Canales, “Planificación de la Conservación y Explotación del Langostino Colorado usando un Modelo de Optimización Estocástica No-Lineal con Recurso,” *CIT*, vol. 13, no. 4, pp. 183–190, Ene. 2002. Disponible en <https://www.citrevistas.cl/a1.htm>
- [12] O. Ahumada, J. R. Villalobos & A. N. Mason, “Tactical planning of the production and distribution of fresh agricultural products under uncertainty,” *Agric Syst*, vol. 112, pp. 17–26, Oct. 2012. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agsy.2012.06.002>
- [13] J. F. Shapiro, “Challenges of strategic supply chain planning and modeling,” *Comput Chem Eng*, vol. 28, no. 6–7, pp. 855–861, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2003.09.013>
- [14] A. Gupta & C. D. Maranas, “Managing demand uncertainty in supply chain planning,” *Comput Chem Eng*, vol. 27, no. 8-9, pp. 1219–1227, Sept. 2003. [https://doi.org/10.1016/S0098-1354\(03\)00048-6](https://doi.org/10.1016/S0098-1354(03)00048-6)
- [15] K. Harrison, D. Henley, H. Riley y J. Shaffer, *Mejoramiento de los Sistemas de Comercialización de Alimentos en los Países en Desarrollo*. SJ, CR: IICA, 1976. Disponible en <https://repositorio.iica.int/handle/11324/14686>
- [16] República de Colombia, Minagricultura, *Apuesta Exportadora Agropecuaria 2006-2020*. BO, CO: Minagricultura. Disponible en <https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/17951>
- [17] A. Barragán, “Huila: Paraíso Frutícola. Programa de competitividad agropecuaria del Huila,” Cadena Frutícola, Neiva, CO, *Informe técnico y de gestión*, 2010. Disponible en <https://www.huila.gov.co/>
- [18] Gobernación del Huila, *Evaluación Agropecuaria del Huila 2007*. Secretaría Agricultura Minería, Neiva, Co, 2017. Disponible en <https://www.huila.gov.co/loader.php?lServicio=Tools2&lTipo=descargas&lFuncion=descargar&idFile=31362>
- [19] L. N. Ramírez y A. M. Otálvaro, “Evaluación de competencias de las regiones para el desarrollo de un clúter útil a la cadena de productiva de passifloras en Colombia,” *Univ Emp*, vol. 17, no. 28, pp. 69–85, 1. <http://dx.doi.org/10.12804/rev.univ.empresa.28.2015.03>
- [20] M. Parra, *Acuerdo de Competitividad para la Cadena Productiva de Pasifloras en Colombia*. Minagricultura: Neiva, CO, 2012. Recuperado de <https://sioc.minagricultura.gov.co/Pasifloras/Normatividad/004%20-%20D.C.%20-%20Acuerdo%20de%20Competitividad%20Cadena%20Pasifloras.pdf>
- [21] M. Parra, “Innovación en el Sistema de Producción de Maracuyá, caso de estudio: Suaza, Huila,” presentado al *III Cong Latam I Cong Mund Pasifloras*, CEPASS, Neiva, Co, 15-17 Mar. 2017. Disponible en <http://cepass.org/>
- [22] J. Coronado, J. P. García, J. Maheut & J. García, “Modelo de optimización estocástica para la planificación de cadenas de suministro para productos con ciclo de vida cortos,” presentado al *4 Int Conf Ind Eng Oper Manag*, CIO, SS, ES, 8-10 Sept. 2010. Recuperado de [http://adingor.es/congresos/web/uploads/cio/cio2010/PRODUCTION\\_PLANNING/1366-1375.pdf](http://adingor.es/congresos/web/uploads/cio/cio2010/PRODUCTION_PLANNING/1366-1375.pdf)
- [23] O. Ahumada & J. R. Villalobos, “Operational model for planning the harvest and distribution of perishable agricultural products,” *Int J Prod Econ*, vol. 133, no. 2, pp. 677–687, Oct. 2011. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2011.05.015>
- [24] W. E. Soto-Silva, E. Nadal-Roig, M. C. González-Araya & L. M. Pla-Aragones, “Operational research models applied to the fresh fruit supply chain,” *Eur J Oper Res*, vol. 251, no. 2, pp. 345–355, Jun. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.08.046>
- [25] J. Mateo, L. M. Pla, F. Solsona & A. Pagès, “A production planning model considering uncertain demand using two-stage stochastic programming in a fresh vegetable supply chain context,” *Springerplus*, vol. 5, pp. 1–16, Jun. 2016. <https://doi.org/10.1186/s40064-016-2556-z>
- [26] A. Megahed & M. Goetschalckx, “Tactical supply chain planning under uncertainty with an application in the wind turbines industry,” *Comput Oper Res*, vol. 100, pp. 287–300, Dec. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2017.12.015>
- [27] J. Carvajal, W. Sarache & Y. Costa, “Planeación óptima de cultivos de caña de azúcar bajo efectos de incertidumbre en los rendimientos y en la fecha de inicio del abastecimiento,” presentado al *9th Inter Conf Prod Res, Americas 2018*, Bo, Co, 2018. Disponible en <https://icpramericas2018.wixsite.com/icpr>
- [28] L. N. Ramírez, N. Obregón & J. A. Cleves, “Understanding the effects of uncertainty in crop planning,” presented at *2016 Industrial and Systems Engineering Research Conference*, ISERC, Anaheim, USA, 2016. Disponible en <https://www.iise.org/Annual12/Details.aspx?id=10150>
- [29] Corabastos. “Corporación de Abastos de Bogotá”. [corabastos.com](http://corabastos.com), 2019. <https://www.corabastos.com.co>
- [30] MinTic. “EVA”. [datos.gov.co](http://datos.gov.co), 2015. <https://www.datos.gov.co/Agricultura-y-Desarrollo-Rural/Evaluaciones-Agropecuarias-Municipales-EVA/2pnw-mmge>
- [31] Arena. (2019), SIMAN. <https://www.clarcat.com/arena/>

**Leila Nayibe Ramírez Castañeda** es Ingeniera Industrial, Magister en Ingeniería Industrial, candidata a Doctor en Ingeniería, y docente en diferentes universidades de Bogotá. Áreas de interés Investigación de operaciones, Logística y producción. Consultora en diferentes proyectos y apoyando organizaciones del sector real en proyectos de investigación. Investigadora Junior última clasificación obtenida por Colciencias. <https://orcid.org/0000-0002-0651-0971>

**Olga Lucía Pardo Beltrán** es ingeniera industrial de la Universidad Libre (Bogotá, Colombia). Sus intereses de investigación están orientados a la investigación de operaciones, planeación y control de producción en sistemas agrícolas y optimización de procesos enfocados hacia la agricultura orgánica y sostenibilidad. <https://orcid.org/0000-0003-3025-6683>