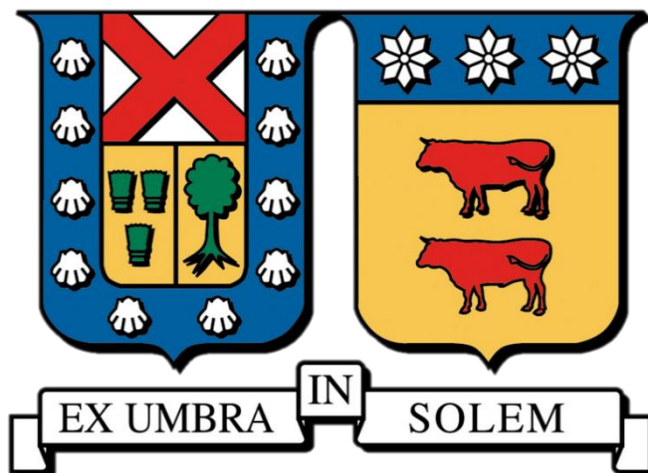


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS



**MODELADO Y RESOLUCIÓN DE UN PROBLEMA DE COSECHA Y
DISTRIBUCIÓN DE FRUTA FRESCA EN CADENAS DE SUMINISTRO
AGRICOLAS RESILIENTES**

**TESIS PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL Y AL
GRADO DE MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA INDUSTRIAL**

ALEJANDRO RIGOBERTO CONTRERAS ROA

PROFESOR GUÍA: DR. VÍCTOR ALBORNOZ SANHUEZA

PROFESOR CORREFERENTE: DR. RODRIGO MENA BUSTOS

PROFESOR CORREFERENTE: DRA. ROSA GONZALEZ RAMÍREZ

SANTIAGO, ABRIL 2025

AGRADECIMIENTOS

Debo agradecer a todos los que hicieron posible todo este proceso que empezó el 2017 al emprender mis estudios universitarios. Son muchas personas las que me han ayudado de diversas maneras a lo largo de mi vida y especialmente los últimos años, quiero valorar desde los actos más cotidianos de simpatía, hasta las mayores muestras de afecto.

Agradezco principalmente a mi familia, en ese sentido, mis logros son más suyos que míos. También agradezco a mi hermana Catalina y su familia, siempre me hicieron sentir querido, especialmente cuando me pidieron ser padrino de mi sobrina. No puedo dejar de mencionar a mi perro, Dante, su compañía me ha ayudado en los días más tristes.

Agradezco a todos los amigos que hice en el camino, mis amigos de la enseñanza media (Zapalleros FC) y mis amigos de la universidad (*Fresh boys* y otros connotados), no quiero mencionar a ningún particular, ya que todos tienen igual valor en mi corazón. Siempre que me pongo a contar cuantos amigos tengo, no puedo evitar sentirme agradecido y afortunado.

Agradezco a mi profesor guía, Víctor Albornoz, por tenerme paciencia y ayudarme con su amplia experiencia en el complejo y edificador proceso que terminó siendo este proyecto final.

RESUMEN EJECUTIVO

Se presenta un enfoque de modelado integrado para apoyar la toma de decisiones en una cadena de suministro agrícola, que considera cosecha, procesamiento y distribución de fruta fresca a diferentes mercados en escenarios disruptivos. El problema incluye la delimitación de predios en zonas de manejo y planificación de la cosecha basada en ventanas óptimas de cosecha para cada zona, en función de la calidad de la fruta. El Procesamiento consiste en prolongar la vida útil de la fruta, un proceso utilizado en el sector frutícola exportador para retrasar la oxidación de frutas y hortalizas, conocido como recubrimiento o *Coating*. El problema de distribución incluye posibles interrupciones en los puertos, lo cual es crucial para los productos frescos que se exportan. La metodología propuesta considera un modelo de optimización estocástica entero-mixto de dos etapas, para crear un marco de planificación resiliente de cadenas de suministro de fruta fresca. Además, el modelo neutral al riesgo se extiende mediante la aplicación de dos formulaciones cuantitativas que integran medidas de riesgo: una basada en *Conditional Value at Risk* (CVaR) y otra enfocada en *Minimization of Total Absolute Deviation* (MOTAD). El Valor de la Solución Estocástica (VSS) demuestra que la incorporación de la incertidumbre permite al modelo encontrar mejores soluciones. Además, la integración de medidas de riesgo en el programa estocástico de dos etapas obliga al modelo a adoptar estrategias operativas más conservadoras para gestionar escenarios disruptivos en la cadena de suministro. El enfoque CVaR permite tomar mejores decisiones operativas para el envío de fruta fresca con mayor vida útil restante a destinos clave en escenarios adversos específicos, mientras que el método MOTAD prioriza la estabilidad general para cumplir con la vida útil requerida en todos los escenarios.

ABSTRACT

This work presents an integrated modeling approach to support decision-making in a three-echelon agribusiness supply chain to harvest, process and distribute fresh fruits to different markets under disruptive scenarios. The harvest problem includes a delineation of the field into management zones and a harvest scheduling based on optimal harvest time windows for each management zone depending on the quality of the fruit. The processing problem consists of extending the shelf-life of the fruit, a process widely used in the fruit export sector to delay the oxidation of fruits and vegetables. The distribution problem includes possible disruptions in ports and transportation, which is critically important for fresh products. The proposed methodology considers a mixed-integer two-stage stochastic optimization model with the goal of making a resilient planning framework for fresh fruit supply chains. Moreover, the risk-neutral model is extended by applying two quantitative risk management formulations: one based on the Conditional Value-at-Risk (CVaR) measure, and another aimed at minimizing the absolute negative deviations with respect to the distribution average (MOTAD). The Value of the Stochastic Solution (VSS) demonstrates that incorporating uncertainty allows the model to find better solutions. Besides, integrating risk measures in the two-stage stochastic program forces it to adopt more conservative operational strategies to handle disruptive scenarios in the supply chain. The CVaR approach makes better operational decisions aimed at shipping fresh fruit with higher remaining shelf-life levels to key destinations in specific adverse scenarios, whereas the MOTAD method prioritizes achieving overall stability in meeting the required shelf-life across all scenarios.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

INTRODUCCIÓN	1
Problema de Investigación	1
Objetivo General	5
Objetivos Especifico	6
Alcance	7
Organización	7
MARCO TEÓRICO.....	8
Mercado Frutícola en Chile	8
Gestión Portuaria y Exportaciones en Chile.....	9
Contratos de Exportación de Frutas.....	14
Cadenas de Suministro Agroalimentarias.....	15
Etapas de Cadenas Agroalimentarias.....	18
Cadenas de Suministro Resilientes	22
Revisiones de Estado del arte de Cadenas de suministro Agrícolas	25
Modelos de Zonificación	27
Modelos Matemáticos en las Cadena Agroalimentarias	29
Atributos Utilizados.....	30
Consideración de Calidad.....	33
Extensión de Vida Útil.....	35
Optimización estocástica en Agricultura.....	36
Optimización bajo Incertidumbre	37
Parámetros bajo incertidumbre	38
Gestión del Riesgo en Agricultura	38

METODOLOGÍA.....	45
Formulación Determinista	46
Formulación Estocástica	55
Modelos que integran Aversión al Riesgo	61
Extensión con CVaR.....	62
Extensión con MOTAD	63
CASO DE ESTUDIO	64
RESULTADOS Y ANÁLISIS	68
CONCLUSIONES	87
REFERENCIAS	89
ANEXOS	107
A.1 PARÁMETROS DEL MODELO	107
A.2 LINEALIZACIÓN DE VARIANZA RELATIVA	109
A.2 ESCALA DE VIDA ÚTIL	109

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: Exportación de frutas y frutos entre 2018 y 2022	10
Tabla 4.1: Países destinos de exportación	66
Tabla 5.1: Resultados del modelo estocástico de 2 etapas neutral al riesgo.....	69
Tabla 5.2: La utilización óptima de puertos propuesta para Instancia 6.....	72
Tabla 5.3: Valor de la solución estocástica.....	73
Tabla 5.4: Comparación de beneficios entre el modelo neutral y averso al riesgo por escenario para Instancia 2	78
Tabla 5.5: Comparación de beneficios entre el modelo neutral y averso al riesgo por escenario para Instancia 6	79
Tabla 5.6: Cumplimiento de vida útil para modelo neutral al riesgo.....	81

Tabla 5.7: Cumplimiento de vida útil para modelo con CVaR integrado, $\varepsilon = 0.1$	81
Tabla 5.8: Cumplimiento de vida útil para modelo con CVaR integrado, $\varepsilon = 0.444$	82
Tabla 5.9: Cumplimiento de vida útil para modelo con MOTAD integrado....	83
Tabla 5.10: Plan de cosecha propuesto para clientes críticos.....	84
Tabla 5.11: Tiempos de resolución caso modelo CVaR integrado.....	86
Tabla 5.12: Tiempos de resolución caso modelo MOTAD integrado	86
Tabla A.1: Costos de procesamiento de chitosan glucosa.....	107
Tabla A.2: Parámetros utilizados en el caso de estudio	108
Tabla A.3: Base de precios utilizadas para generar escenarios	108
Tabla A.4: Base de severidad de interrupción utilizada para generar escenarios	108

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Exportaciones de Chile 2017-2022	10
Figura 2.2 Flujo de operaciones en puertos chilenos.....	13
Figura 2.3: Tramitación general de exportaciones.....	14
Figura 2.4: Diagrama de cadena de suministros agroalimentaria.....	15
Figura 2.5: Clasificación de estrategias de resiliencia.....	23
Figura 2.6: Clasificación Cadenas de Suministro.....	40
Figura 3.1 Cadena de suministro modelada.....	46

Figura 4.1: Referencia de predio rectangular utilizado	64
Figura 4.2: Disponibilidad Observada de Puerto de Valparaíso	67
Figura 4.3: Disponibilidad Observada de Puerto de San Antonio.....	67
Figura 4.4: Disponibilidad Observada de Puerto de San Vicente.....	68
Figura 5.1: zonas de manejo propuestas por el modelo estocástico de 2 etapas	70
Figura 5.2: Beneficio esperado por escenario para Instancia 2	71
Figura 5.3: Beneficio esperado por escenario para Instancia 6	71
Figura 5.4: Distribución de beneficios, $\rho = 1.0$, 100 muestras de NDVI.....	74
Figura 5.5: Distribución de beneficios, $\rho = 0.9$, 100 muestras de NDVI.....	74
Figura 5.6: Distribución de beneficios, $\rho = 0.75$, 100 muestras de NDVI	75
Figura 5.7: Distribución de beneficios, $\rho = 0.5$, 100 muestras de NDVI.....	75
Figura 5.8: Distribución de beneficios, $\rho = 1.0$, 180 muestras de NDVI.....	76
Figura 5.9: Distribución de beneficios, $\rho = 0.9$, 180 muestras de NDVI.....	76
Figura 5.10: Distribución de beneficios, $\rho = 0.75$, 180 muestras de NDVI	77
Figura 5.11: Distribución de beneficios, $\rho = 0.5$, 180 muestras de NDVI.....	77

INTRODUCCIÓN

Problema de Investigación

La población mundial al año 2022 era de 7.95 billones (miles de millones) de personas y desde 1960 lleva décadas en constante crecimiento (Banco mundial, 2023). En Chile, la tendencia está alineada con el resto del mundo. En efecto, el censo efectuado el año 2017 muestra que entre 2002 y 2017 la tasa media anual de crecimiento es del 1% (Instituto Nacional de Estadísticas, 2017).

La Organización Mundial de la Salud recomienda consumir al menos 400 gramos de frutas o verduras al día para reducir el riesgo de contraer enfermedades no transmisibles (World Health Organization, s.f.). Nguyen et al. (2021) también resaltan la necesidad de consumir frutas o verduras a diario. Por el contrario, se observa una reducción en las hectáreas per cápita utilizadas para agricultura. Según FAO (2021b), en 1990 se utilizan aproximadamente 0,9 hectáreas per cápita, mientras que el 2019 se utilizan aproximadamente 0,6 hectáreas per cápita. La misma tendencia se conserva al revisar las magnitudes absolutas, sin considerar la población mundial. En 1990 hay 4,8 billones de hectáreas utilizadas para agricultura, esa cifra baja a 4,75 billones en 2019 (con fluctuaciones intermedias). La producción y el consumo mundial de frutas y verduras están significativamente por debajo del umbral necesario para cumplir con la ingesta recomendada. En consecuencia, en 2017 aproximadamente 4 millones de muertes prematuras en todo el mundo se atribuyeron a un consumo insuficiente de frutas y verduras (FAO, 2021a)

En Chile, la superficie sembrada de cultivos anuales de la temporada 2022/2023 tiene un estimado de 505.236 hectáreas cultivadas, 69.856.728,62 quintales o 6.985.672.862

kilogramos de producto cosechado (Instituto Nacional de Estadísticas, s.f.). El sector de la agricultura, ganadería, silvicultura y pesca ocupa a aproximadamente 505.822 personas a octubre del 2024, de los cuales un 54,4% son trabajadores permanentes y un 45,6% son trabajadores temporales (Oficina de Estudios y Políticas Agrarias, 2023a). Una cantidad importante de la fruta cosechada en Chile se exporta a otros países. Durante el período enero-octubre de 2023 se registra un total de exportaciones de fruta de 2.944.000 toneladas, de los cuales 70,7% corresponde a fruta fresca, 20,1% a fruta procesada (jugos, aceites, conservas, congelados, deshidratados), y 9,1% a frutos secos (Oficina de Estudios y Políticas Agrarias, 2023b).

En el contexto de las reflexiones sobre los desafíos que enfrenta la agricultura en Chile, la Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (2018) menciona como parte de los desafíos relacionados al comercio internacional, el mantener y mejorar los procesos que permitan que los estándares de inocuidad y calidad se adapten a las exigencias de los mercados de destino y puedan hacer frente en forma rápida y segura a las contingencias que puedan suscitarse a fin de mantener las relaciones económicas y comerciales en el mejor estado posible. En el mismo documento también se valora la necesidad de utilizar de forma sistemática antecedentes, información y conocimientos basados en ciencia, generados desde procesos conocidos de evaluación de riesgos para implementar políticas de calidad e inocuidad de los alimentos.

Durante la pandemia global de COVID-19, se puso de manifiesto la verdadera importancia que tienen las cadenas de suministro agroalimentarias en el diseño de las estrategias empresariales, especialmente en momentos excepcionales, cuando el proceso logístico debe ser lo suficientemente robusto como para seguir asegurando el suministro de

productos (Ali et al., 2021; Montanyà & Amat, 2023; Liu et al., 2023; Subsecretaría de Transportes, 2023). Aun así, la robustez es solo una de las propiedades que puede tener una estrategia que adopta una cadena de suministros. Behzadi et al. (2018) proponen un criterio de clasificación para medidas de gestión del riesgo en cadenas de suministro agroalimentarias. En particular definen la robustez como la capacidad de una cadena de suministros para aguantar interrupciones con niveles de pérdida aceptables, por otra parte, definen la resiliencia como la capacidad que tiene una cadena de suministros de volver a niveles adecuados de operación luego de una interrupción.

En ese contexto, ante la creciente complejidad de los problemas de gestión agrícola, la Investigación de Operaciones (IO) presenta una herramienta alternativa y poderosa para apoyar las decisiones en el área agrícola (Borodin et al., 2016; Higgins et al., 2010), donde tradicionalmente el juicio empírico resultante de la experiencia representa la base para la gestión agrícola (France & Thornley, 1984; Weintraub & Romero, 2006). Además, las herramientas de IO se han utilizado ampliamente en el sector agrícola desde finales de la década de 1940 (Higgins, et al. 2010), por lo que, a la fecha, la literatura es rica en variedad de acercamientos. Notar igualmente que la gestión de cadenas de suministro agrícola es compleja en toda su extensión funcional, producción, cosecha, almacenamiento y distribución (Ahumada & Villalobos, 2009).

Por otra parte, la toma de decisiones en condiciones de incertidumbre es uno de los principales problemas del sector agrícola. En las operaciones “aguas arriba”, la gestión de la producción agrícola se enfrenta al cambio climático (Kusumastuti et al., 2016; Jonkman et al., 2019), las disparidades interregionales en el clima, la calidad del suelo dispar, los factores estacionales a lo largo del tiempo, la disponibilidad de capital, entre otros (Weintraub &

Romero, 2006). Análogamente, “aguas abajo” en la cadena de producción, el mercado agrícola es particularmente volátil, heterogéneo y extremadamente sensible a las fluctuaciones económicas y financieras (Ahumada & Villalobos, 2011a; Borodin, et al 2016).

Dentro de las cadenas de suministro agroalimentarias de fruta fresca, la cosecha es uno de los pasos más importante, ya que debe realizarse en un período relativamente corto de intensa actividad y con recursos limitados (Ferrer et al., 2008; González-Araya et al., 2015; Soto-Silva, et al. 2017; Jonkman et al., 2019). Además, este tipo de cadenas de suministro se caracteriza por largos tiempos de entrega o “*lead times*” (Aramyan et al., 2006; Behzadi et al., 2017; Lowe & Preckel, 2004; Verdouw et al., 2010). A lo anterior se suma la incertidumbre sobre la oferta y la demanda, márgenes relativamente estrechos y el almacenamiento como una actividad crítica (Lowe & Preckel, 2004; Soto-Silva et al., 2016). Además, la logística de frutas frescas es un problema relacionado con el equilibrio entre el precio alcanzable en el mercado y la calidad del producto (Nadal-Roig & Plà-Aragonés, 2015).

En la producción de fruta fresca, se presenta una mayor facilidad para implementar modelos de planificación que coordinan varias etapas de la cadena de suministro, ya que, como consecuencia de la globalización, competencia, regulación, incremento de demanda de altos estándares de calidad, valor agregado y productos personalizados, el sector de la fruta fresca tiende a presentar alta integración vertical en las cadenas de suministro, para ser más competitivos y dinámicos (Ahumada & Villalobos, 2011b; Soto-Silva, et al. 2016). A pesar de lo anterior, las cadenas de suministro normalmente se vuelven más vulnerables cuando aumentan su complejidad (Liu et al., 2023).

A la luz de los antecedentes expuestos, surgen los siguientes cuestionamientos

¿Cuáles son las variables y parámetros relevantes para realizar la planificación de una temporada de cultivo, cosecha y posterior distribución? ¿Dónde se considera la incertidumbre en un modelo antes determinista, para potenciar su usabilidad? ¿Cómo se utiliza la incertidumbre para modelar interrupciones en la cadena de suministros? ¿Cómo se puede plantear un modelo de planificación que sea adverso al riesgo? ¿Aumenta excesivamente la carga computacional al resolver el modelo? ¿Cómo se condensan las consideraciones anteriores en un modelo de planificación óptima de zonificación, cosecha y distribución de alimentos perecibles?

Este trabajo de tesis surge de la necesidad y el interés por diseñar y potenciar modelos de optimización para planificación óptima en cadenas de suministro agroalimentarias, maximizando utilidades e invirtiendo solo en los recursos necesarios, con el objetivo de acercar propuestas teóricas a la realidad y volver viable su utilización, buscando las variables y parámetros necesarios para modelar algunas de las interrupciones con las que convive una cadena de suministros, incluyendo la posición del tomador de decisiones con respecto al riesgo como parámetro relevante para la herramienta de planificación que se propone.

Objetivo General

Formular un modelo de optimización estocástica sensible a la aversión al riesgo para modelar zonificación, cosecha y distribución en una cadena de suministro de productos agrícolas perecibles, maximizando beneficios y considerando la incertidumbre en parámetros del problema para modelar interrupciones en la etapa de distribución y construir una herramienta de toma de decisiones resiliente.

Objetivos Especifico

- Estudiar modelos de optimización deterministas o estocásticas propuestos para cadenas agroalimentarias de productos perecibles o pertinentes, a través de una revisión bibliográfica de los modelos mencionados.
- Estudiar metodologías específicas de gestión del riesgo utilizadas en modelos de optimización estocástica que consideran posición con respecto al riesgo del tomador de decisiones, a través de una revisión bibliográfica de modelos utilizados en el contexto agroalimentario o financiero.
- Determinar variables y parámetros pertinentes al contexto, necesarios para modelar la cadena de suministro y determinar aspectos a considerar bajo incertidumbre para modelar interrupciones en la cadena de suministro, a través investigación de disrupciones clásicamente consideradas.
- Desarrollar un modelo de optimización estocástica que pueda plasmar el proceso de zonificación, cosecha y distribución, bajo la consideración de parámetros con incertidumbre propia del rubro que puedan reflejar las disrupciones propias de una cadena de suministro. Adicionalmente, el modelo considera posición con respecto al riesgo por parte del tomador de decisiones.
- Realizar pruebas al modelo propuesto, con un caso de estudio construido con

instancias aleatorias, para validar la metodología propuesta.

Alcance

Primeramente, se realiza una revisión de la literatura respecto a modelos de optimización, deterministas o estocásticos, utilizados para la toma de decisiones en el contexto de cadenas de suministro agroalimentaria de productos perecibles, con un foco en frutas frescas. Parte de la revisión de literatura se apoya en modelos de optimización que consideran gestión del riesgo, de esa manera, se recaban variadas metodologías para considerar la aversión del riesgo, para incorporar una en el modelo propuesto.

También se propone considerar como inciertos parámetros que puedan modelar disrupciones en el flujo de materias de la cadena de suministros, en la línea de considerar la resiliencia como una característica deseable, para modelar contratiempos que efectivamente ocurren en la realidad.

El trabajo desarrollado se puede utilizar como un punto de partida de trabajos futuros, relacionados a tomar distintas consideraciones de incertidumbre, nuevas etapas de la cadena de suministro, posibles acercamientos algorítmicos alternativos para resolver el modelo, o cualquier alteración que pudiera acercar al modelo a uno más utilizable por un agente real.

Organización

El presente trabajo de tesis se organiza en 5 capítulos. En lo que sigue, el Capítulo 2 contiene el marco teórico de la investigación, donde lo ahí presentado resume conceptos necesarios para comprender el modelo propuesto y, mostrar enfoques clásicos utilizados hasta ahora para modelar cadenas de suministro agroalimentarias. El Capítulo 3 muestra la

metodología utilizada, un modelo de optimización estocástica sensible al riesgo para planificación óptima que considera decisiones de zonificación del predio, cosecha, procesamiento y distribución del producto, donde los parámetros considerados bajo incertidumbre están pensados para simular interrupciones en la etapa de distribución. El Capítulo 4 muestra el caso de estudio que se utilizará para realizar pruebas al modelo. El Capítulo 5 presenta el análisis de los resultados obtenidos al aplicar el modelo propuesto. Finalmente, en el Capítulo 6 se exponen las conclusiones obtenidas y, se enumeran posibles futuros trabajos de investigación.

Como complemento, existe el artículo que resume la investigación, el cual ha sido enviado para su publicación en la revista *Annals of Operations Research*. La investigación también se presentó en el congreso internacional XXXVII ENDIO - XXXV EPIO 2024.

MARCO TEÓRICO

Mercado Frutícola en Chile

En su investigación sobre la evolución de la fruticultura en Chile entre los años 1999 y 2019, Pefaur (2020) muestra que el 77% de la superficie nacional de frutales se encuentra en 4 regiones, la Región de O'Higgins (25%), la Región del Maule (22%), la Región Metropolitana (15,3%) y la Región de Valparaíso (14,7%), las cuales suman un total de 263.745 hectáreas plantadas. La superficie destinada a plantación de especies frutales aumenta cada año, pasando de 182,6 miles de hectáreas en 1999 a 342,7 miles de hectáreas el año 2019. En ese período se destaca una proliferación de plantaciones de cerezo (crecimiento medio anual del 39,8%), nogal (9,3%), avellano (39,8%), olivo (11,4%) y arándano (23,8%). De manera coincidente, según el boletín expuesto por la Oficina de

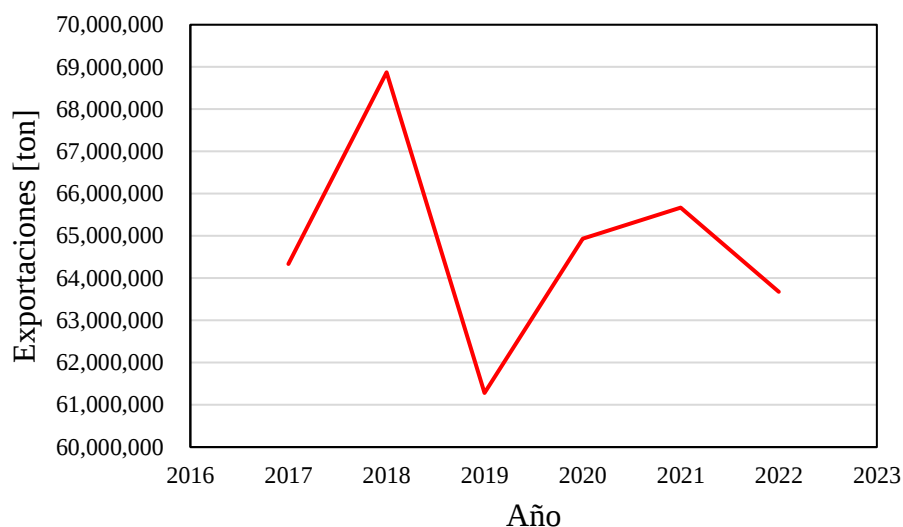
Estudios y Políticas Agrarias (2023b), la fruta más exportada entre enero y octubre de 2023 es la cereza. En 1999 se contabilizan 14.521 huertos frutales, tal cantidad asciende a 16.923 huertos al año 2018. En su estudio, Pefaur (2020) expone que al año 2019, del total producido exportado, un 70% corresponde a fruta fresca, otro 20% se comercializa después de procesar producto (conservas, congelados, deshidratados, jugos y aceites), y el último 10 % corresponde a frutos secos. Tal estructura en las exportaciones de productos agrícolas responde a un aumento intensivo de exportación de fruta fresca. Durante el horizonte de 20 años de análisis, utilizando las ventas como indicador de crecimiento, se observa una tasa media de crecimiento anual de 7,1%, pasando de 1.342 a 5.305 millones de dólares FOB.

Para complementar la información anterior, se puede acudir al boletín publicado por la Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (2023b) hacia finales del 2023. Al 2022 existen 375.598 hectáreas de superficie frutal, como es esperable, lidera el cerezo con 61.559 hectáreas utilizadas.

Gestión Portuaria y Exportaciones en Chile

Según los datos expuestos por el Observatorio Logístico (2022), las instalaciones portuarias muestran tener un rol fundamental en la economía de Chile, en la Figura 2.1 se observan las exportaciones en toneladas de años recientes. De los volúmenes exportados aproximadamente un 96,7% abandona el país por vías marítimas, fluviales y lacustres cada año.

Figura 2.1: Exportaciones de Chile 2017-2022



Nota. Se muestran cifras agregadas por año, gráfica de elaboración propia. Fuente: Observatorio Logístico, 2022.

El informe anuario estadístico que dispone el Servicio Nacional de Aduanas (2023), también entrega antecedentes importantes. El 2022 se exporta un total de 98.006,2 millones de dólares FOB, 59% constituye solo exportación minera. De la exportación no minera en el año 2022 un 17% corresponde a exportación de frutas y frutos, donde lidera el negocio de las cerezas con un 5,4%, tal como se muestra en la Tabla 2.1. Al año 2022, los alimentos en general resultan ser la segunda fuerza exportadora de Chile, solo por detrás del cobre (Chilealimentos, s.f.)

Tabla 2.1: Exportación de frutas y frutos entre 2018 y 2022

Productos No Mineros	2018	2019	2020	2021	2022	Participación 2022
Cerezas	1141,6	1632,3	1585,2	1820,4	2163,3	5,4%
Uvas	1395,6	1414,2	1164,7	1055,9	1007,7	2,5%
Arándanos	767,9	680,7	667,8	715,6	712,5	1,8%
Manzanas	774,9	648,2	616,6	642,9	547,4	1,4%
Nueces de nogal	436,8	427,2	386,9	471,8	474,9	1,2%

Ciruelas	337,2	358,9	354	386,4	474,4	1,2%
Paltas	325,1	378,7	285,3	252,8	223,6	0,6%
Kiwis	207,8	192,9	216,3	251,6	186,7	0,5%
Frambuesas y moras	114	105,3	104,8	117,4	151,2	0,4%
Frutillas	62,7	92	123,7	147,9	130,4	0,3%
Mandarinas y clementinas	214	198,5	241,7	208	129,1	0,3%
Peras	129,1	129,1	122,9	131,9	124,1	0,3%
Duraznos y nectarinas	142,3	147,6	141,5	140,6	124	0,3%
Avellanas	73,1	87,3	153,7	154	120,7	0,3%
Naranjas	81,7	78,7	98,5	109,3	67,7	0,2%
Limones	133,6	91	103,1	83,7	47,9	0,1%
Maquis	0,7	0,7	0,3	0,8	1,0	0,0%
Resto frutas y frutos	145,7	175,9	141,7	149,4	130,5	0,3%
Total Frutas y frutos	6483,7	6839,4	6508,9	6840,3	6817,0	17,0%

Nota. La participación se calcula con respecto al total de exportación no minera, las cifras son millones de dólares FOB. Fuente: Servicio Nacional de Aduanas, 2023.

Como es natural, el funcionamiento de los puertos y la salida y entrada de embarcaciones está condicionado al contexto meteorológico, por lo mismo, la Armada de Chile tiene la facultad de limitar operaciones específicas en los puertos, o paralizar las faenas de transferencia (Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante, 2019). Las eventualidades que surgen debido al mal clima terminan entorpeciendo la planificación de los puertos, el Decreto 103 (2011) establece la obligación de las empresas portuarias de diseñar planes maestros, el mismo decreto explica que un plan maestro “tiene como propósito entregar un conocimiento oportuno a los usuarios, operadores, particulares y órganos del Estado, de las áreas asignadas para las distintas actividades y servicios portuarios, así como de las disponibilidades de espacios marítimos y terrestres” (Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, 2011).

Existen dos agentes estatales importantes en el proceso de importación y exportación en los puertos, el Servicio Agrícola y Ganadero (SAG), y el Servicio Nacional de Aduanas.

El SAG es un organismo a cargo del Ministerio de Agricultura que aporta al desarrollo de la agricultura, bosques y ganadería. El SAG verifica que los productos animales y vegetales que se importan y exportan sean aptos para su consumo y facilita la apertura a nuevos mercados para la exportación (SAG, 2019). El Servicio Nacional de Aduanas (s.f.), participa fiscalizando, simplifica y agiliza las operaciones de importación y exportación. Adicionalmente, tal como señala la Subsecretaría de Transportes (2023) en su consolidado de diagnósticos y propuestas, en el sector logístico-portuario intervienen múltiples actores públicos, pero sin reflejar una estructura clara y sistémica de autoridad. Se destacan los siguientes:

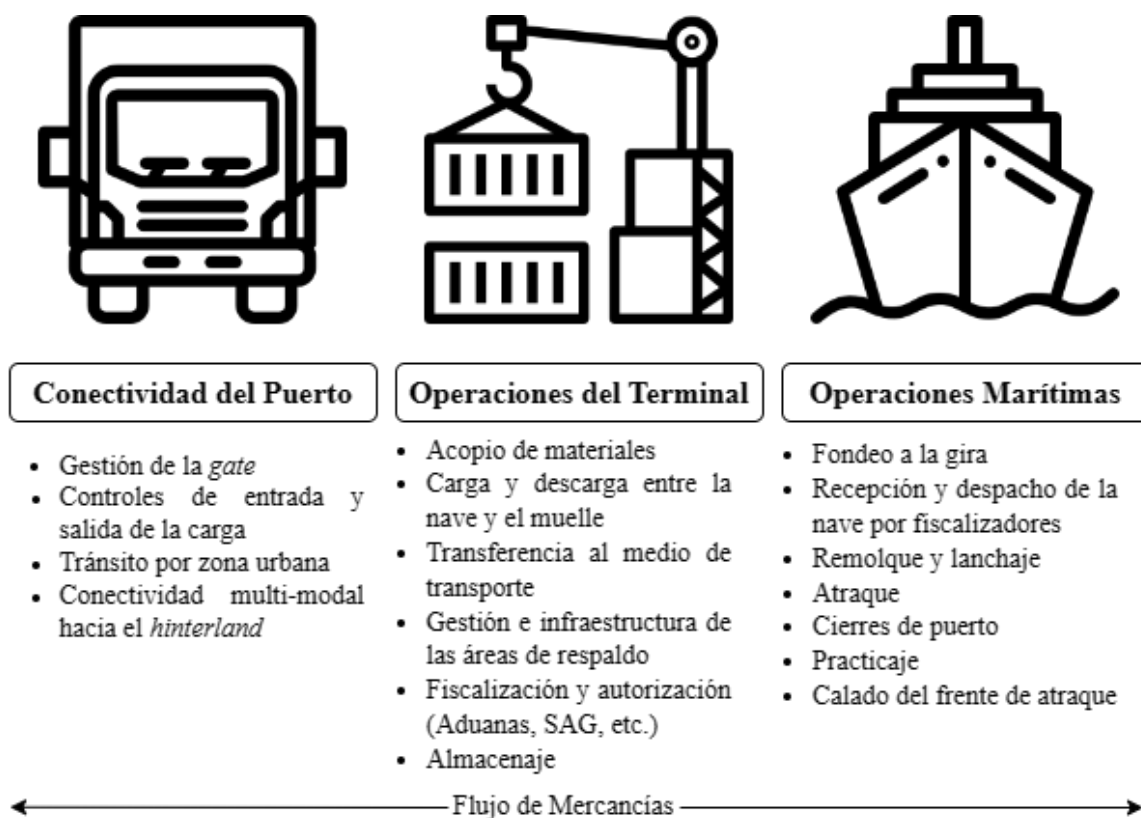
- El Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, responsable de la planificación integral de sistemas de transporte.
- Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante (DIRECTEMAR), es la autoridad marítima del país, norman la seguridad de las operaciones marítimo-portuarias y de los servicios de apoyo.
- Subsecretaría para las Fuerzas Armadas, del Ministerio de Defensa Nacional (SSFFAA), responsables de la administración del borde costero y de otorgar las concesiones para el desarrollo de puertos privados.
- Dirección de Obras Portuarias del Ministerio de Obras Públicas (DOP), como organismo técnico responsable de; la revisión y validación de proyectos de ingeniería portuaria; el desarrollo de infraestructuras para la conectividad.
- Sistema de Empresas (SEP), como asesor del Estado para el control y gestión de las empresas portuarias estatales.

La falta de estructura sistémica entre el SAG, el Servicio Nacional de Aduanas y

demás organismos mencionados genera vulnerabilidad e ineficiencias en la logística-portuaria (Subsecretaría de Transportes, 2023).

En la Figura 2.2 se muestran los tres procesos operativos necesarios para cargar mercancías en buques para su posterior exportación. Se utilizan algunas definiciones propias del rubro; la “*gate*” se refiere a un espacio físico donde hay fiscalización física y documental para garantizar estándares de seguridad; el “*hinterland*” se refiere a la zona de influencia territorial del puerto, el lugar donde transitan las mercancías y pasajeros; el “*Fondeo a la gira*” se refiere a la maniobra de navegar con el ancla apeada a velocidad mínima para mejorar manejo de la nave.

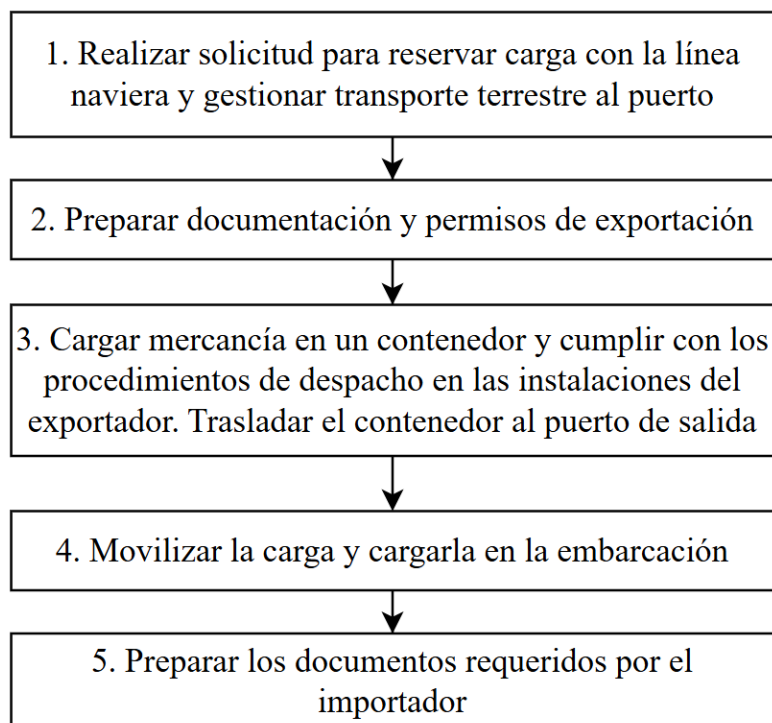
Figura 2.2 Flujo de operaciones en puertos chilenos



Nota. Diagrama de elaboración propia.

Finalmente, en el modelamiento propuesto de la cadena de suministro de exportación de manzanas frescas, López-Campos et al. (2019) dejan ver las principales tramitaciones necesarias embarcar fruta fresca y vender en mercados internacionales (ver Figura 2.3)

Figura 2.3: Tramitación general de exportaciones



Nota. Diagrama de elaboración propia. La imagen muestra pasos para embarcar mercancías de exportación. Fuente: López-Campos et al. (2019).

Contratos de Exportación de Frutas

En el artículo publicado por Codron y Lizarraga (2020) referente a contratos de exportación de frutas en Chile, se expone con claridad la dinámica general entre exportadores chilenos e importadores internacionales. Ese tipo de transacciones tienen fuertes niveles de incertidumbre por la naturaleza perecible y la volatilidad de los precios (los precios de productos perecibles fluctúan diariamente). Tradicionalmente se utilizan 2 tipos de contratos:

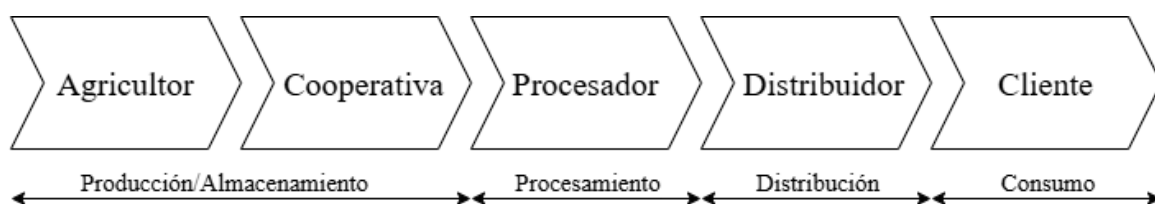
- Consignación: el exportador envía la mercancía al importador, quien debe vender en el mercado de destino al mejor precio que puede obtener. La consignación es libre si no se fija un precio mínimo garantizado con expectativa de mejora.
- Venta en firme: implica que las partes firman un precio previo al envío de la mercadería.

Tal dinámica se utiliza independientemente de la existencia de un respaldo firmado por ambas partes.

Cadenas de Suministro Agroalimentarias

La industria alimentaria juega un papel importante al proporcionar los elementos básicos y necesarios para respaldar diversas actividades y comportamientos humanos (Cooper & Ellram, 1993). El interés por las cadenas de suministro agroalimentario y las cadenas de suministro de frutas en particular han crecido significativamente, impulsadas por la creciente tendencia de estilos de vida más saludables y ecológicos, sumado a la expansión de la población mundial (Kusumastuti et al., 2016; Soto-Silva et al., 2016). Una cadena de suministros agroalimentaria tiene 5 actores principales asociados a 4 procesos (Cooper & Ellram, 1993; Hovelaque et al., 2009; Beske et al., 2014), ver Figura 2.4 y Sección 2.4.1.

Figura 2.4: Diagrama de cadena de suministros agroalimentaria



Nota. Diagrama de elaboración propia.

De la misma manera, en su revisión del estado del arte de modelos matemáticos de

cadena de suministro en el área agroalimentaria, Ahumada y Villalobos (2009) describen las cadenas de suministro agrícolas, como sistemas formados por las organizaciones responsables de la producción (agricultores), la distribución, procesamiento y comercialización de productos agrícolas a los consumidores finales. Alternativamente y, dependiendo del contexto, algunos autores resaltan una etapa de preprocesamiento y la etapa de transporte que comunica cada proceso (Apaiah & Hendrix, 2005; Gigler et al., 2002). Apaiah y Hendrix (2005) incluyen la fuerza de ventas como eslabón importante entre la distribución y el consumidor final. En cuanto a su finalidad, las cadenas agrícolas cumplen la función de trasladar los cultivos productivos desde los campos hasta los clientes finales, transformando las materias primas en productos que se obtienen, preparan y consumen (Jabarzadeh et al., 2020; King & Phumpiu, 1996). Si bien es un proceso de varias etapas, típicamente los modelos de planificación propuestos no consideran todas las etapas de la cadena de suministros (Kusumastuti et al., 2016). Sin embargo, los cambios en los requerimientos de los consumidores impactan en los procesos e interacciones de toda la cadena de suministros (Apaiah & Hendrix, 2005), en consecuencia, deben ser redes altamente dinámicas con diferentes modos de cooperación, control y coordinación (Verdouw et al., 2010; Gómez-Lagos et al., 2020).

Lo que diferencia a las cadenas de suministro agroalimentarias de otras cadenas de suministro, es la importancia que desempeñan factores como la calidad y seguridad de los alimentos y la variabilidad relacionada con el clima (Salin, 1998; López-Campos, 2019). Adicionalmente, los productos tienen vida útil limitada, hay variabilidad en la demanda y los precios, lo que hace que ese tipo de cadenas sea más difícil y compleja de gestionar respecto a otras (Ahumada & Villalobos, 2009). Para el caso agrícola, Nestlé (2012) propone reducir

la complejidad de la cadena mejorando la relación con cooperativas agrícolas, pagando un sobreprecio por la calidad y mejorando los retornos de los agricultores.

Otra distinción clave de las cadenas de suministro agrícolas, es el desarrollo de la calidad de los productos agrícolas a medida que avanzan a través de la cadena de suministro, es decir, la perecibilidad puede ocurrir en una o más etapas a lo largo de la cadena (Amorim et al., 2013; Boselie et al., 2003; Nahmias, 1982). Kusumastuti et al. (2016) sugieren hacerse cargo de dicho desafío invirtiendo en mayor capacidad de procesamiento de productos e inventario. También es importante gestionar oportunamente las condiciones de temperatura y humedad en todas las etapas de la cadena de suministro, para prolongar la cantidad y calidad del producto (Aung & Chang, 2014; Kim et al., 2015). En la misma línea, algunos autores destacan la necesidad de un buen manejo del almacenamiento con condiciones más controladas para prolongar la vida útil de frutas frescas (Verdouw et al., 2010; Muriana, 2017; Salihoglu et al., 2018; Flores et al., 2019; Paam et al., 2019).

Por otra parte, Behzadi (2018) en su investigación referente a metodologías de gestión del riesgo utilizadas en cadenas de suministro agroalimentarias, menciona otras tres razones más que aumentan la complejidad de las operaciones: (1) la globalización ha hecho que las cadenas de suministro sean más largas y complejas, por tanto, las cadenas de suministro ahora están expuestas a más riesgos y se han vuelto más vulnerables; (2) la filosofía de gestión “*Lean*” se ha implementado ampliamente en muchas industrias, esta filosofía aboga por la minimización de redundancias/pérdidas y adopta logística “*Just in Time*”, lo anterior mejora la eficiencia de la cadena de suministro, pero aumenta la vulnerabilidad de la cadena de suministro ante eventos adversos; por último, (3) el mundo presta cada vez más atención a las numerosas interrupciones en la cadena de suministro causadas por eventos catastróficos.

Por último, cabe mencionar que según Van der Vorst (2000), las cadenas de suministro agroalimentarias se pueden clasificar en dos grandes tipos:

- Cadenas de suministro de productos agrícolas frescos: las características intrínsecas del producto se mantienen prácticamente intactas hasta que llegan al consumidor final.
- Cadenas de suministro de productos alimenticios procesados: los productos agrícolas se utilizan como materia prima para elaborar productos procesados de mayor valor añadido.

Etapas de Cadenas Agroalimentarias

Tomando como principal guía lo definido por Kusumastuti et al. (2016), se consideran los siguientes procesos como los de principal interés en las cadenas agroalimentarias:

- Cultivo: La primera etapa de la cadena agroalimentaria corresponde en seleccionar las semillas y las zonas a utilizar (Kusumastuti et al., 2016). Posteriormente, se nutren los cultivos utilizando fertilizantes y aplicando controles de plagas y enfermedades (Ahumada & Villalobos, 2009). En esta etapa el stock de la producción se encuentra en cultivos (Grado & Strauss, 1995). Mientras los cultivos crecen, muchas veces las actividades de cultivo y cosecha se superponen. Se pueden tener múltiples locaciones con cultivos significativamente distintas (Ahumada & Villalobos, 2011b).
- Cosecha: Durante el período de crecimiento, los cultivos se cosechan, los productos pueden almacenarse en bodegas locales antes de ser transportado a las instalaciones

de preprocesamiento (de ser necesario). El rendimiento de la cosecha tiende a ser de naturaleza incierta, en términos de cantidad, calidad y momento (Kusumastuti et al., 2016). Esta etapa resulta compleja debido a limitaciones de tiempo y recursos (Ahumada & Villalobos, 2011b; Ferrer et al., 2008). La cosecha está limitada por condiciones climáticas, por lo que pueden llegar a existir desperdicios si no se recolectan los cultivos cuando están maduros (Glen, 1987). El proceso se puede realizar manualmente o utilizando maquinarias (Varas et al., 2020; Ferrer et al., 2008; Flores et al., 2019).

- **Preprocesamiento:** Preparaciones previas necesarias, tales como pelado, deshidratación, limpieza general o redimensionamiento (Apaiah & Hendrix, 2005). Para los productos frescos, se busca aumentar la vida útil, con métodos de recubrimiento o embalaje especializado, el objetivo es retrasar la oxidación de las frutas o verduras (Maia et al., 1997). En el caso de productos de larga vida útil, por ejemplo granos, la cosecha pasa por un proceso de trillado (Gewinner et al., 1996). Las actividades de preprocesamiento y procesamiento se pueden ejecutar las mismas instalaciones o no, dependiendo de la naturaleza de los cultivos y la complejidad del producto final (Kusumastuti et al., 2016).
- **Procesamiento:** Se cambian propiedades importantes de lo cosechado. En la etapa de procesamiento de frutas normalmente se generan conservas, congelados, deshidratados, jugos y aceites vegetales (Oficina de Estudios y Políticas Agrarias, 2023b). Los alimentos en conserva alargan su vida útil porque los alimentos

esterilizados están separados del ambiente exterior por recipientes sellados (Shan, 2015). La refrigeración de alimentos perecibles suprime tanto el crecimiento de bacterias como las reacciones químicas adversas que ocurren en condiciones atmosféricas normales (Akdemir, 2008), por lo mismo, se comercializan alimentos congelados. La deshidratación es un proceso de eliminación de agua que detiene el crecimiento de microorganismos en la cosecha (Kurozawa et al., 2012). El Aceite vegetal se extrae de algunas semillas como las de girasol, colza, soja o sésamo (Kohansal et al., 2023). El jugo se obtiene extrayendo el néctar de frutas o vegetales mediante presión, cocción o destilación (Real Academia Española, s.f). Los jugos de frutas pueden someterse a diferentes grados de procesamiento, como filtración con carbón y desionización, según sea necesario, para eliminar el sabor, el color, la acidez, etc. (Ashurst et al., 2017), también puede someterse a un proceso de concentración, para luego almacenarse o utilizarse como materia prima en otro proceso (Schuster & Allen, 1998). En esta etapa las plantas procesadoras necesitan identificar productores con materia prima de alta calidad al planificar la compra de productos frescos (Soto-Silva et al., 2017). Otro procesamiento corresponde a tratamientos de recubrimiento sobre lo cosechado, que reduce el intercambio de humedad entre el producto y el ambiente, otorgando resistencia mecánica y proporcionando un estado gaseoso ideal para evitar cambios fisiológicos indeseables en el producto (Gao et al., 2013).

- Almacenamiento: Son locaciones de concentración de productos terminados o en proceso. Los puntos de almacenamiento pueden estar asociados a diferentes etapas de una cadena agrícola (Kusumastuti et al., 2016). La gestión de inventario de

productos perecibles tiene como uno de sus objetivos reducir los costos por desperdicio (Van Donselaar et al., 2006; Ahumada & Villalobos, 2009; Paam et al., 2019). La gestión inadecuada de inventarios es una de las principales causas de desperdicios postcosecha (Shukla & Jharkharia, 2013). Para ofrecer una mejor disponibilidad a los clientes, Ahumada y Villalobos (2011a) proponen instalar puntos de almacenamiento cerca de los consumidores finales.

- Transporte: Las actividades de transporte se realizan para trasladar los productos desde los sitios de cosecha hasta los puntos de demanda de los clientes. Igualmente se transportan productos entre las instalaciones utilizadas para el procesamiento o almacenamiento, mientras más complejo sea el producto final normalmente las instalaciones están más separadas (Kusumastuti et al., 2016).

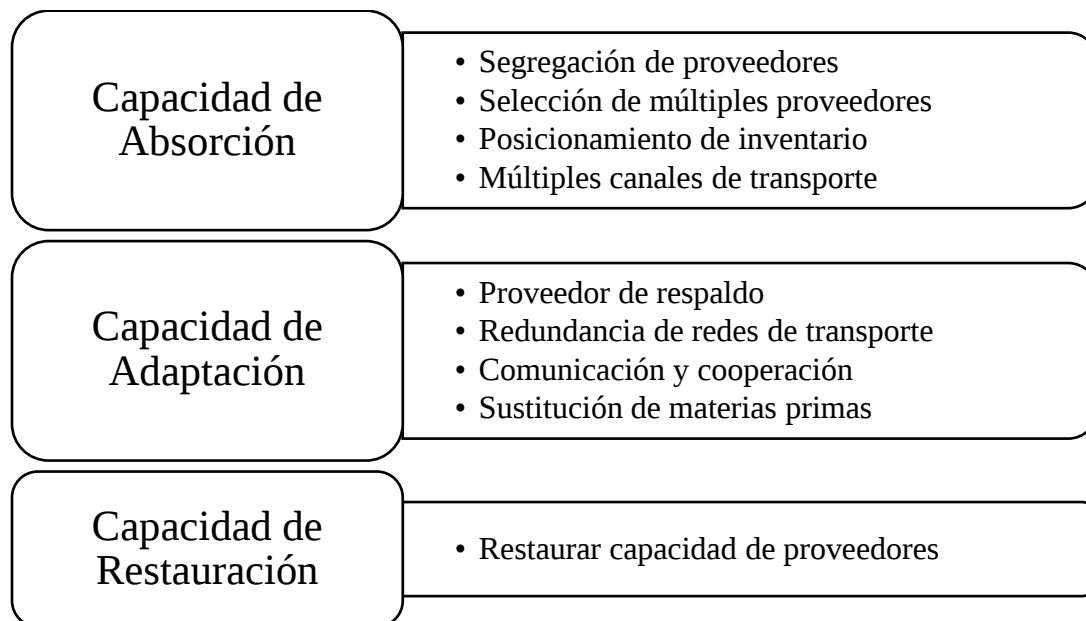
Habitualmente, las instalaciones de preprocesamiento/procesamiento tienen una capacidad limitada (Kusumastuti et al., 2016). Las distintas etapas pueden ser gestionadas por una misma organización o se pueden tercerizar procesos. Aouadni et al. (2019) mencionan que la selección de proveedores de materia prima para plantas procesadoras puede ser complicada y, requiere mucho tiempo formar relaciones estables entre productores y procesadores. Mateo-Fornés et al. (2023) comentan que, para el caso de cadenas de suministro de frutas fresca, el transporte de cultivos a frigoríficos y desde allí hasta la planta procesadora, normalmente se subcontrata a terceros. Existe una compensación o “*trade-off*” entre los costos de almacenamiento y transporte, y la calidad de los cultivos entregados a los clientes (Ahumada & Villalobos, 2011a).

Cadenas de Suministro Resilientes

La resiliencia es entendida como la propiedad de una cadena de suministro para recuperarse rápida y efectivamente de una disrupción para abastecer demanda y garantizar rendimiento (Hosseini et al., 2019; Lee & Moon, 2024). En su artículo, Behzadi et al., (2020) exponen que, si bien existe gran cantidad de estudios cuantitativos del tema, los estudios cuantitativos son limitados, al igual que Rajesh (2016) comentan que dicha propiedad debería poder identificarse y evaluarse mediante indicadores de desempeño y, la resiliencia resulta ser una propiedad deseable en las cadenas de suministro, especialmente si se manejan productos perecibles, donde el tiempo es crítico. Eventos disruptivos en la cadena de suministro pueden traer pérdidas en ventas y participación de mercado (Hendricks & Singhal, 2005), además de daños graves a las vidas de las personas y a la economía global (Liu et al., 2023). Higgins et al. (2010) concluyen en su investigación que las cadenas de suministro agrícolas deben adoptar la resiliencia como objetivo para lograr mayores participaciones de mercado, lo que puede resultar mucho más crítico en contraste a la eficiencia de suministro.

En su investigación, Hosseini et al., (2019) destacan algunas políticas de mitigación y recuperación utilizadas en la literatura, como mayor distribución geográfica de las instalaciones de producción, protección de los lugares de fabricación, utilizar redundancias operativas y flexibilidad en las capacidades de producción, transporte e inventario. Van más allá y proponen una clasificación en tres clases de estrategias de resiliencia (ver Figura 2.5).

Figura 2.5: Clasificación de estrategias de resiliencia



Nota. La imagen muestra estrategias generales utilizadas para aportar resiliencia a cadenas de suministro. Fuente: Review of quantitative methods for supply chain resilience analysis.

Por Hosseini, S., Ivanov, D., y Dolgui, A, Transportation research part E: logistics and transportation review.

En su búsqueda por métricas para medir la resiliencia, Behzadi et al. (2020) proponen un modelo de optimización estocástica de 2 etapas con escenarios de disrupción, donde la disrupción consiste en que se pierde capacidad de embarque en los puertos para despachar el producto. La medida de resiliencia consiste en modelar el acceso a capacidad de embarque “*backup*”. Alternativamente, Wiedenmann & Geldermann (2015) potencian la resiliencia de la cadena de suministro considerando un proveedor de reserva de linaza, en caso de que el proveedor principal fracasa, el precio del proveedor de reserva es elevado ya que se considera una penalización por no existir un contrato previo. Saliendo del contexto agrícola Namdar et al. (2017) igualmente modelan la posibilidad de acudir a proveedores de respaldo, con la

necesidad de reservar capacidad en una primera etapa.

Asian y Nie (2014) también modelan la interrupción de un proveedor principal, estos autores modelan el evento como un proceso Bernoulli en el que se puede acceder a proveedores de reserva.

Alternativamente en un modelo de planificación de cadenas de suministro agrícola, Behzadi et al. (2017), toman como variable de decisión la estrategia de mitigación de riesgo a utilizar, las cuales pueden ser: proveedores de respaldo, acotar probabilidad de disrupción o diversificación de proveedores. Los autores concluyen que se llegan a mejores resultados al mezclar dichas estrategias tanto robustas como resilientes en vez de seleccionar una sola medida.

Similarmente, Lee y Moon (2024) proponen un modelo de optimización estocástica para planificar selección de proveedores y asignación de productos para abastecer demanda, considerando un conjunto discreto de escenarios con probabilidad de disrupción de proveedores a nivel individual o regional, y modelando fluctuaciones de demanda por efectos de acaparamiento. Como estrategias de mitigación el modelo incluye decisiones relacionadas a: proveedores de *backup*, producción extra y demanda no satisfecha.

Finalmente, Liu et al., 2023, proponen un modelo de optimización robusta (RO) para seleccionar políticas gubernamentales óptimas contra disrupciones en una cadena de suministro. El procedimiento primero utiliza un *Causal Bayesian Network* para modelar como se transmite una disrupción a lo largo de la cadena de suministros, luego se estima el impacto de las políticas gubernamentales sobre la disrupción, y por último se construye un modelo de RO para encontrar políticas óptimas.

Revisiones de Estado del arte de Cadenas de suministro Agrícolas

En las recientes década y por el reciente interés que tomaron las cadenas de suministro agroalimentarias para productos frescos o procesados (Kusumastuti et al., 2016; Soto-Silva et al., 2016), muchos autores revisan las tendencias existentes entre los artículos publicados para comprender el estado del arte del tópico. Dicha tarea siempre arroja luz sobre oportunidades de futuras investigaciones al evidenciar necesidades sin resolver en los trabajos actuales.

Lowe y Preckel (2004) revisan artículos que abordan los problemas de planificación de cultivos de la agroindustria, enfocado en el análisis de asignación de instalaciones agrícolas para ubicar almacenes y plantas de procesamiento, concluyen que existe una necesidad de rediseñar estrategias de gestión de inventario, transporte y distribución, especialmente para alimentos perecibles.

Weintraub y Romero (2006) revisan artículos que abordan problemas de planificación en los sectores agrícola y forestal, destacan la necesidad de desarrollar métodos para analizar la incertidumbre y el riesgo.

Ahumada y Villalobos (2009) revisan artículos que analizan las cadenas agroalimentarias relacionadas con producción y distribución de cultivos, identifican la necesidad de incorporar características realistas como el riesgo, la incertidumbre y la integración de la totalidad de la cadena. También mencionan que la programación lineal (LP) y la programación lineal entera-mixta (MILP) son las herramientas más aplicables en este contexto.

Shukla y Jharkharia (2013) revisan artículos que abordan cuestiones operativas en cadenas de suministro de productos frescos como la previsión de la demanda, planificación

de cultivos, gestión de inventarios y transporte. Resaltan que existe poca atención en las pérdidas por cosecha ineficiente, puesto que la mayoría de los artículos buscan maximizar ingresos y cumplir estándares de satisfacción del consumidor.

Tsolakis et al. (2014), analizan artículos relacionados a la toma de decisiones en las cadenas de suministro agroalimentarias, considera modelos con y sin planificación de cultivos, para decisiones estratégicas, tácticas u operativas. Se concluye que hace falta planificación logística integrada en las cadenas.

En una revisión referente a artículos enfocados en herramientas de IO aplicadas para modelar incertidumbre en cadenas de suministro agrícolas, realizada por Borodin et al. (2016), revelan que desarrollar una agricultura resiliente es parte de las preocupaciones agrícolas futuras, además de las tradicionales (calidad, seguridad alimentaria, rendimiento de los cultivos y costos). Adicionalmente, los modelos de Programación Multietapa y Programación estocástica dinámica son pobremente utilizados en el contexto de agricultura, debido a que pocos modelos consideran la revelación dinámica de la incertidumbre a lo largo del tiempo.

Kusumastuti et al. (2016) revisan artículos relacionados a planificación de cultivos, cosecha y procesamiento. Concluyen que la cosecha y el procesamiento en modelos integrados de cadenas agroalimentarias no están investigados a cabalidad, la literatura existente normalmente estudia partes de la cadena de suministro por separado. También menciona la necesidad de considerar posición con respecto al riesgo de los productores y dar más atención al control de inventario.

Soto-Silva et al. (2016) enfocan su revisión en modelos de planificación de cadenas de suministro de frutas frescas, mencionan que se requieren modelos más competentes para

enfrentar la demanda creciente, los mayores estándares de calidad, y el ambiente competitivo. Al igual que Ahumada y Villalobos (2009) también concluyen que la mayoría de los modelos se enfocan en solo una parte de la cadena y no en una integración logística mayor.

Behzadi et al. (2018) recopilan modelos cuantitativos utilizados para la gestión del riesgo en cadenas de suministro agrícolas. También detectan varias necesidades en el agronegocio: (1) la vida útil es una omisión importante que debe incorporarse en modelos relativos a gestión de interrupciones, (2) se deberían considerar varios períodos en situaciones de interrupción para modelar la pérdida de calidad y considerar la correlación temporal de los riesgos de interrupción, (3) modelar, al mismo tiempo, interrupciones de alto impacto con incertidumbre en actividades operativas, (4) las estrategias resilientes de gestión del riesgo tienen poca atención, especialmente ante perturbaciones raras y (5) utilizar enfoques de soluciones de gestión del riesgo que se puedan aplicar en la práctica.

Nguyen et al. (2021) dedican su investigación a la revisión de artículos relacionados a planificación de cadenas de suministro de fruta fresca. Resaltan cuatro desafíos en los modelos: considerar las diferentes etapas de la cadena, para lograr más eficiencia e integración logística; modelos que sean capaces de adquirir datos o actualizar parámetros de dichos sistemas informativos de alta tecnología; estandarizar métricas de desempeño para evaluar resultados de modelos de planificación para cadenas de suministro de fruta fresca; modelar incertidumbre, integración logística, perecibilidad y calidad del producto. Resaltan la utilidad de incorporar medidas de gestión del riesgo.

Modelos de Zonificación

Los factores que determinan el rendimiento y la calidad de un cultivo varían temporal

y espacialmente, por lo tanto, para ser más eficientes, las gestiones agrícolas deben ser específicas para cada sección de un predio y programarse dinámicamente. El uso de zonas de manejo basadas en propiedades del suelo o del cultivo permite representar la variabilidad que se puede observar dentro de cada campo, donde una zona de manejo es una subregión de un campo de cultivo relativamente homogénea con respecto a una propiedad dada (pH del suelo, cantidad de fósforo, cantidad de materia orgánica, etc). La mayoría de los métodos propuestos para dividir el campo en zonas de manejo utilizan algoritmos de *clustering*. Entre estos métodos se encuentran el algoritmo de segmentación de cuencas hidrográficas (Roudier et al., 2008), el análisis de componentes principales (Ortega & Santibanez, 2007), el agrupamiento jerárquico (Ruß & Kruse, 2011), las *k-means* difusas (Córdoba et al., 2016) y las *k-means* multivariadas (Ohana-Levi et al., 2019), entre otros.

Alternativamente, la literatura sobre problemas de zonificación incluye métodos basados en modelos de optimización. El método de zonificación propuesto por Cid-García et al. (2013) presenta un modelo de programación entera binaria (MILP) que permite parcelar un campo en zonas de manejo homogéneas y rectangulares, basándose en el concepto de varianza relativa (*RV*). Suponiendo un conjunto de N puntos de muestra de una propiedad de suelo o cultivo y una partición de un campo en Q zonas de manejo, donde cada zona z incluye n_z del total de puntos de muestra, denotamos por σ_z^2 la varianza de la propiedad de suelo o cultivo de la zona z y σ^2 la varianza de todo el campo. La *RV* toma valores entre 0 y 1, y puede expresarse de la siguiente manera:

$$RV = 1 - \frac{\sum_{i=1}^Q (n_z - 1) \sigma_z^2}{(N - Q) \sigma^2} \quad (2.1)$$

Una mayor varianza relativa indica una mayor homogeneidad interna dentro de cada

zona de manejo que compone la partición del predio. Nótese que el valor de RV más alto se obtiene cuando la varianza σ_z^2 de cada zona de manejo es cero. Por el contrario, el valor de RV más bajo se obtiene cuando la partición consta de una sola zona de manejo, representada por el propio predio no homogéneo.

Aparte de la metodología anterior, el uso de modelos y algoritmos de optimización se ha extendido a zonas de manejo más generales y se han integrado más decisiones del contexto agrícola en el problema. Cid-García y Ibarra-Rojas (2019) proponen un modelo de optimización lineal integrado para problemas de zonificación y planificación de cultivos que, al mismo tiempo genera una partición basada en una propiedad química para la asignación de cultivos y otra partición basada en una propiedad física para actividades de riego. Salama et al. (2020) aplican un modelo de programación lineal para resolver problemas de zonificación y planificación de cultivos. Velasco et al. (2023) y Vicencio-Medina et al. (2025) generan zonas de gestión con formas ortogonales (formas de L o T) que minimizan el número de zonas requeridas para delinear el campo con base en algoritmos de distribución. Albornoz et al. (2022) presenta un modelo integrado de optimización para el problema de planificación y programación de la cosecha que considera la delimitación de zonas de manejo para la cosecha manual, por lo que el enfoque integrado permite obtener zonas de manejo óptimas y su periodo de cosecha con asignación de recursos en un plan integrado.

Modelos Matemáticos en las Cadena Agroalimentarias

Como se menciona antes, varias herramientas de investigación de operaciones han sido ampliamente utilizadas en el contexto agrícola. Un tomador de decisiones podría intentar maximizar los beneficios de la operación, o minimizar los costos para cumplir una meta.

Atributos Utilizados

Los principales atributos utilizados en modelos relacionados a cadenas de suministro agroalimentarias se presentan a continuación.

- Definición de zonas de manejo: Como se ya se ha revisado, dependiendo de la variabilidad en las condiciones del predio, se pueden delinear zonas de manejo particulares para cultivos (Albornoz et al., 2022; Cid-García & Ibarra-Rojas, 2019; Cid-García et al., 2013).
- Selección de cultivos: Algunos modelos toman decisiones respecto a lo que se pueda cultivar por zona/bloque (Ahumada & Villalobos, 2011b; Ahumada et al., 2012; Cid-García & Ibarra-Rojas, 2019; Filippi et al., 2017; Flores & Villalobos, 2020; Flores et al., 2019; Jonkman et al., 2019; Peinado-Guerrero et al., 2024).
- Asignación de agua para cultivos: (Ahumada et al., 2012; Ahumada & Villalobos, 2011b; Flores & Villalobos, 2020; Tong & Guo; 2013; Flores et al., 2019; Flores & Villalobos, 2020).
- Horizonte de planificación: Extensión o cantidad de periodos sobre los cuales se toman decisiones operativas (Ahumada & Villalobos, 2011a; Ahumada & Villalobos, 2011b; Ahumada et al., 2012; Darby-Dowman et al., 2000; Ferrer et al., 2008; Flores & Villalobos, 2020; Flores et al., 2019; González-Araya et al., 2015; Jonkman et al., 2019; Soto-Silva et al., 2017).

- Limitación de recursos: En la cadena se utilizan recursos limitados, contratación, predios, inventario, tiempo, procesamiento, entre otros (Ahumada & Villalobos, 2011a; Ahumada & Villalobos, 2011b; Ahumada et al., 2012; Bohle et al., 2010; Darby-Dowman et al., 2000; Ferrer et al., 2008; Flores & Villalobos, 2020; Flores et al., 2019; González-Araya et al., 2015; Jonkman et al., 2019; Soto-Silva et al., 2017).
- Contratación: Modelos usualmente toman decisiones de contratación y despidos, donde normalmente se opta por trabajadores temporales y permanentes (Ahumada & Villalobos, 2011a; Ahumada & Villalobos, 2011b; Ahumada et al., 2012; Albornoz et al., 2022; Bohle et al., 2010; Ferrer et al., 2008; Gómez-Lagos et al., 2020; González-Araya et al., 2015; Varas et al., 2020).
- Control de inventario: Modelos dimensionan capacidad de inventario necesaria a lo largo del horizonte de planificación para llevar a cabo operaciones (Ahumada & Villalobos, 2011a; Ahumada & Villalobos, 2011b; Ahumada et al., 2012; Flores & Villalobos, 2020; Flores et al., 2019; Jonkman et al., 2019; Liu et al., 2018; Mateo-Fornés et al., 2023; Nakandala et al., 2016; Soto-Silva et al., 2017).
- Volumen cosechado: Decisión de cantidad cosechada (Ahumada & Villalobos, 2011a; Ahumada & Villalobos, 2011b; Ahumada et al., 2012; Albornoz et al., 2022; Bohle et al., 2010; Darby-Dowman et al., 2000; Ferrer et al., 2008; Flores & Villalobos, 2020; Flores et al., 2019; Gómez-Lagos et al., 2020; Jonkman et al., 2019; Varas et al., 2020).

- Selección de tecnología de cosecha y cultivo: Algunos trabajos dejan al modelo decidir respecto a si la cosecha se realiza manualmente o con máquinas (Bohle et al., 2010; Ferrer et al., 2008; Flores & Villalobos, 2020; Flores et al., 2019; Gómez-Lagos et al., 2020; González-Araya et al., 2015; Varas et al., 2020).
- Rutas de cosecha: Se refiere a decisiones de precedencia de cosecha entre bloques de cultivo (Bohle et al., 2010; Ferrer et al., 2008; Varas et al., 2020).
- Desarrollo de calidad/vida útil: Como parámetro clave de decisión de periodo de cosecha algunos integran la calidad o vida útil restante de la fruta respectiva (Ahumada & Villalobos, 2011a; Ahumada & Villalobos, 2011b; Ahumada et al., 2012; Ferrer et al., 2008; Gómez-Lagos et al., 2020; González-Araya et al., 2015; Jabarzadeh et al., 2020; Jonkman et al., 2019; Liu et al., 2018; Mateo-Fornés et al., 2023; Peinado-Guerrero et al., 2024; Soto-Silva et al., 2017; Rong et al., 2011; Varas et al., 2020).
- Procesamientos varios: (Ahumada & Villalobos, 2011a; Ahumada & Villalobos, 2011b; Ahumada et al., 2012; Apaiah & Hendrix, 2005; Flores & Villalobos, 2020; Flores et al., 2019; Jonkman et al., 2019; Munhoz & Morabito, 2014; Varas et al., 2020).
- Transporte de productos: Se consideran tiempos de transporte de cargas de frutas,

cantidad de viajes y tiempo disponible (Ahumada & Villalobos, 2011a; Ahumada & Villalobos, 2011b; Ahumada et al., 2012; Albornoz et al., 2022; Apaiah & Hendrix, 2005; Flores & Villalobos, 2020; Flores et al., 2019; Jabarzadeh et al., 2020; Mateo-Fornés et al., 2023; Nadal-Roig & Plà-Aragonés, 2015; Nakandala et al., 2016; Soto-Silva et al., 2017).

- **Distribución:** Se refiere a decisiones de puertos y destinos a atender (Ahumada & Villalobos, 2011a; Ahumada & Villalobos, 2011b; Ahumada et al., 2012; Darby-Dowman et al., 2000; Flores & Villalobos, 2020; Flores et al., 2019; Gómez-Lagos et al., 2020; González-Araya et al., 2015; Jabarzadeh et al., 2020; Jonkman et al., 2019; Namdar et al., 2017; Peinado-Guerrero et al., 2024; Rong et al., 2011).

Para el presente trabajo se consideran los siguientes atributos: definición de zonas de manejo, horizonte de planificación, limitación de recursos, contratación, control de inventario, volumen cosechado, desarrollo de vida útil, procesamientos, transporte de fruta y distribución a destino.

Consideración de Calidad

Una cuestión importante relacionada a la planificación agrícola es la calidad deseada que exigen los consumidores y su comportamiento de aceptación (Ahumada & Villalobos, 2011a). La industria ha visto un énfasis cada vez mayor en la calidad con especificaciones más estrictas en materia de consistencia, seguridad y trazabilidad (Lowe & Preckel, 2004; Rong et al., 2011). Al mismo tiempo, el precio de la fruta depende de la variedad y los

estándares de calidad, para que la fruta reciba un precio superior, debe ser de la calidad óptima (Md Nor & Ding, 2020). La tasa de deterioro es mayor para alimentos no procesados, por lo que la gestión de inventario entre la cosecha y preprocesamiento/procesamiento es crucial (Kusumastuti et al., 2016).

Ferrer et al. (2008) y Bohle et al., (2010) proponen un modelo de planificación óptima de cosecha de uvas para producir vino, utilizan una función de pérdida de calidad del vino debido a desviaciones con respecto a la fecha óptima de cosecha. Dichas desviaciones se calculan luego de revisar la curva de maduración de las uvas, la cual representa la maduración del fruto en función del tiempo. Tradicionalmente la estimación de la curva de maduración se realiza con métodos estadísticos, por ejemplo, regresiones lineales (Munhoz & Morabito 2014).

Ahumada y Villalobos (2011a) utilizan dos métodos para considerar la maduración del tomate en la planificación de cosecha. El primero busca estimar la probabilidad de rechazo de un lote por parte del cliente, por medio de muestreo. El segundo, es una función que disminuye el valor de los cultivos a lo largo del tiempo.

Ahumada y Villalobos (2011b) gestionan la perecibilidad limitando el tiempo máximo de almacenamiento, que depende de la vida útil del cultivo, e incorporando métricas/parámetros que puedan usarse como indicador de la frescura a lo largo de la cadena de suministro (ej. coloración de los tomates). La pérdida de calidad durante el transporte impacta en la función objetivo. Munhoz y Morabito (2014) igualmente utilizan una curva de maduración de naranjas para determinar estrategia óptima de cosecha. De manera similar, González-Araya et al. (2015) proponen un modelo de planificación táctica para la temporada de cosecha donde penalizan la función objetivo por pérdida de calidad de la fruta.

Behzadi et al. (2020) utilizan un factor de degeneración para modelar perecibilidad de un producto en un horizonte de cuatro períodos. En cada período se pondera el inventario de productos utilizando el factor de degeneración para reducir el inventario, lo reducido se considera merma. De manera similar, Liu et al. (2018) utilizan un factor de supervivencia para reducir la fruta en inventario cada periodo de planificación.

En el modelo de transporte entre granjas y almacenes propuesto por Nakandala et al. (2016) se analiza con bastante profundidad la degradación de calidad de cadenas de suministros frescas, utilizan la ecuación de Arrhenius (expresión que relaciona la velocidad de una reacción química con la temperatura a la que se realiza) para estimar el deterioro de calidad entre viajes. Dicho modelo toma inspiración de lo propuesto por Rong et al. (2011), que utiliza una función de degradación de calidad que resulta de resolver la ecuación diferencial:

$$\frac{dq}{dt} = kq^n \quad (2.2)$$

En la ecuación (2.2) q representa la calidad del producto, k es una tasa de degradación que depende directamente de la temperatura y n es orden de la reacción que se mueve entre 0 y 1. Para frutas frescas $n = 0$, con carnes en general se utiliza $n = 1$.

Extensión de Vida Útil

La gestión de cadenas de suministro para productos frescos es más compleja respecto a otras cadenas por la naturaleza perecible de los productos, las fluctuaciones en la demanda y los precios, el alto interés por la seguridad alimentaria (Van der Vorst & Beulens, 2002) y la naturaleza perecible del producto (Peinado-Guerrero et al., 2024). Como precaución, Md Nor y Ding (2020) postulan que las mejoras en la gestión postcosecha y la utilización de

nuevas tecnologías para prolongar la vida útil con un menor costo de distribución son fundamentales para mantener estándares de calidad.

Existen diferentes tipos de cámaras frigoríficas, como las de atmosfera regular (RA), atmosfera controlada (CA), atmósfera controlada “*smart-fresh*” (SFCA), atmósfera controlada dinámica (DCA) (Veltman et al., 2003; Mateo-Fornés et al., 2023). En las cámaras tipo RA solo la temperatura y humedad son controladas, mientras que en las cámaras tipo CA y SFCA se regula el nivel de oxígeno y dióxido de carbono en la atmosfera (Rama & Narasimham, 2003).

En lugar de depender de temperaturas de almacenamiento baja, Md Nor y Ding (2020) proponen implementar tratamientos de recubrimiento sobre lo cosechado. El procedimiento reduce el intercambio de humedad entre el producto y el ambiente, otorga resistencia mecánica y proporciona un estado gaseoso ideal para evitar cambios fisiológicos indeseables (Gao et al., 2013). El recubrimiento puede contener sustancias antibacterianas y antifúngicas, por ejemplo, algunas sales (carbonato de amonio, sorbato de potasio), aceites esenciales y extractos de plantas. La técnica clave de un buen recubrimiento, es una buena adherencia a la superficie de la fruta que cubra los poros y las perforaciones de la membrana disponibles en el epicarpio de la fruta. La constitución química óptima del recubrimiento va a depender del producto.

Optimización estocástica en Agricultura

Siempre existe incertidumbre en las operaciones relacionadas con la agricultura debido a una gran variedad de factores (Mateo-Fornés et al., 2023). Estos incluyen la biología, las enfermedades en los cultivos, el clima y el mercado, más las complejidades

logísticas (Borodin et al., 2016; Soto-Silva et al., 2016; Liu et al., 2018; Jabarzadeh et al., 2020), por lo mismo, es necesario proponer modelos que capturen la variabilidad inherente en esos parámetros (Bohle et al., 2010; Ahumada et al., 2012). Adicionalmente, Munhoz y Morabito (2014), argumentan que incorporar incertidumbre en algunos parámetros del modelo de planificación puede conducir a una representación más realista. Ahumada et al. (2012) resaltan la usabilidad de modelos de optimización estocástica de dos etapas, los mismos se explican en la sección 2.7.1.

Optimización bajo Incertidumbre

De considerar la incertidumbre que enfrenta un tomador de decisiones, destacan dos acercamientos clásicos al problema, la programación estocástica (SP) y la optimización robusta (RO) (Neos Guide, 2025). Cuando los parámetros se conocen sólo dentro de ciertas cotas, un enfoque favorable es la optimización robusta. En cambio, los modelos de programación estocástica aprovechan el hecho de que las distribuciones de probabilidad que gobiernan los datos son conocidas o pueden estimarse (Stochastic Programming Society, s.f.). El procedimiento con mayor relevancia (SP) lo propone el mismo creador del Método Simplex, George Dantzig (1955). Discretizado el espacio muestral de las posibles realizaciones de una variable aleatoria, se definen variables de recurso (“*Wait and See*”) asociadas a la realización de cada escenario, junto a variables de decisión de primera etapa (“*Here and now*”) que representan decisiones proactivas tomadas antes de que se revele la incertidumbre (Kall & Wallace, 1994). Higle (2005) expresa que su desventaja es la expansión significativa en la cantidad de variables y restricciones, lo que aumenta la carga computacional de resolver dichos problemas.

Parámetros bajo incertidumbre

Ahumada et al. (2012) proponen un modelo de optimización estocástica para planificación óptima de plantación, cosecha y distribución, consideran incertidumbre en el rendimiento de los cultivos y los precios de demanda. Consideran bajo incertidumbre los mismos parámetros: Adesina & Ouattara (2000), Flores y Villalobos (2018), y Peinado-Guerrero et al. (2024). De manera similar, el modelo de Albornoz et al. (2019) considera incertidumbre en las propiedades del suelo y el rendimiento de los cultivos.

Munhoz y Morabito (2014) utilizan un modelo de optimización robusta para planificación óptima en una cadena de producción de jugo de naranja, considerando incertidumbre en la acidez de los jugos extraídos de las naranjas.

Bohle et al. (2010) realiza la extensión estocástica del modelo de cosecha propuesto por Ferrer et al. (2008), considerando el rendimiento de cosecha como incierto para construir un modelo de optimización robusta. El rendimiento de los cultivos depende de las condiciones del suelo y climáticas, por lo mismo, Flores & Villalobos (2020) proponen un modelo de optimización estocástica de dos etapas para asignación de agua, selección de cultivos y cosecha, donde consideran incierta la temperatura en los periodos de planificación.

En el modelo de planificación de compras y almacenamiento óptimo para el diseño de una cadena de suministro de fruta fresca propuesto por Mateo-Fornés et al. (2023), usan un modelo de optimización estocástica de dos etapas para incluir incertidumbre en los costos de las operaciones que se realizan en períodos de planificación futuros.

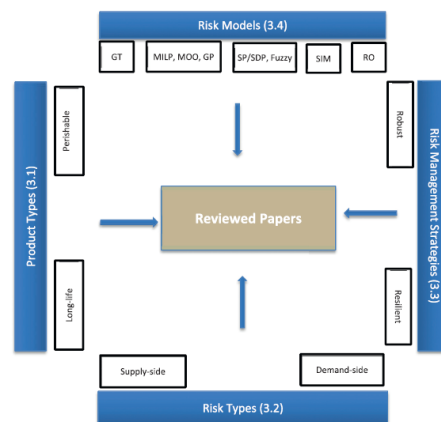
Gestión del Riesgo en Agricultura

Existe una necesidad de construir modelos de planificación de cadenas de suministro

agrícolas que consideren gestión del riesgo (Epperson & Estes 1999), ya que el riesgo y la incertidumbre son características inherentes de la producción agrícola (Adesina & Ouattara, 2000; Behzadi et al., 2017). Una gestión de riesgo clásica de una cadena de suministro tiene cuatro componentes: identificación, valoración, respuesta, seguimiento y evaluación (Ivanov, 2018). Hay variabilidad en el rendimiento de los cultivos, el agua disponible, la demanda, precios del mercado, entre otros. En general, existe incertidumbre en los siguientes parámetros (Cleveland & Soleri, 2005): precio de suministros, rendimiento de cultivos, calidad de la cosecha, ventana de tiempo de cultivo y cosecha, tamaño de cultivo bajo variaciones de clima, rendimiento de cosecha, tamaño de demanda, precio de venta y elasticidad de precios de demanda.

Behzadi et al. (2018) realiza una reseña de los principales modelos cuantitativos usados para tomar decisiones en cadenas de suministro agrícolas que toman en cuenta el riesgo. La investigación propone una clasificación para los métodos de gestión del riesgo utilizados (Figura 2.6), los acercamientos matemáticos utilizados son teoría de juegos (GT), programación entera-mixta (MILP), optimización multiobjetivo (MOO), programación por objetivos (GP), programación estocástica (SP), programación dinámica estocástica (SDP), optimización difusa, simulación (SIM) y optimización robusta (RO).

Figura 2.6: Clasificación Cadenas de Suministro



Nota. La imagen muestra cuatro criterios desarrollados en función de la literatura revisada por los autores de la investigación. Fuente: Behzadi et al. (2018).

Tang (2006) clasifica los riesgos que enfrenta una cadena de suministros en dos clases: riesgos operativos y riesgos de interrupción. Los riesgos de operación son causados por la incertidumbre propia del negocio y ocurren con mayor frecuencia, mientras que los riesgos de interrupción se refieren a incidentes mayores como desastres naturales o provocados por el hombre (Fahimnia et al., 2015; Hosseini et al., 2019), normalmente las interrupciones tienen mayor impacto. En esta misma línea, Vali-Siar et al. (2022) destacan la importancia de evaluar y gestionar los riesgos de interrupción (condiciones naturales, detenciones en rutas de transporte, detenciones portuarias, etc.). Adesina y Ouattara (2000), muestran en su investigación que al considerar los riesgos provenientes la incertidumbre de los precios y rendimiento en la cosecha, los agricultores podrían mejorar sus ingresos generales. Ali et al. (2021) resaltan que las cadenas de suministro agroalimentaria contemporáneas están globalmente interconectadas, por lo que una interrupción en cualquier etapa puede tener un impacto en términos de escasez y pérdidas económicas. Esto ha hecho

que la gestión de riesgos de las cadenas de suministro sea un área atractiva para investigadores y gerentes (Fahimnia et al., 2015; Fagundes et al., 2020).

Entre los primeros intentos de modificar modelos de optimización para incluir métricas de gestión del riesgo, se encuentra un artículo publicado por Freund (1956), el cual modela el beneficio a maximizar como variable aleatoria. Boussard y Petit (1967) resaltan que en general las estrategias más clásicas (y antiguas) buscan maximizar alguna función de utilidad que depende de las ganancias esperadas y los momentos de su distribución de probabilidad. Dichas estrategias se alinean con uno de los supuestos del método de selección de portafolio propuesto por Markowitz (1952), donde el retorno esperado es algo deseable y la variabilidad de ese retorno es algo indeseable.

Ahumada et al. (2012), los cuales proponen un modelo de programación estocástica de dos etapas para planificación de cultivo, cosecha y distribución, incluyen una métrica para minimizar la desviación esperada de los beneficios en cada escenario (Q_s) con respecto a un valor deseado T , tal como se observa en la ecuación (2.3) (que solo muestra una parte de la función objetivo), el componente λ representa la aversión al riesgo por parte del tomador de decisiones, valores más altos de λ muestran un comportamiento conservador.

$$\max -\lambda \sum_s prob_s (T - Q_s) \quad (2.3)$$

Lo anterior es similar a lo utilizado por Darby-Dowman et al. (2000), que utiliza el modelo de minimización de la desviación absoluta total (MOTAD), donde el riesgo se mide en términos de las desviaciones absolutas del beneficio en cada escenario con respecto al beneficio esperado, ver ecuación (2.4). También su utiliza un como medida de aversión al riesgo, ahora tomando valores entre 0 y 1. Una ventaja de usar esta herramienta es que el modelo de optimización permanece lineal.

$$\max (1 - \lambda) E(Profit_s) - \lambda E(|Profit_s - E(Profit_s)|) \quad (2.4)$$

El MOTAD es propuesto por Hazell (1971) como alternativa al modelo de programación cuadrática que surge de considerar la esperanza y la varianza de la media, tal como propone Markowitz (1952). Después de usar ambos modelos en un caso aplicado, el autor muestra que se llega a resultados similares en ambos casos, las mismas conclusiones se refuerzan en otra publicación (Norton & Hazell, 1986).

Otra metodología ampliamente utilizada en la gestión del riesgo es el “*Value at Risk*” (VaR). El VaR nace en el mundo financiero, en el contexto de buscar métodos eficientes de selección de portafolio. Fijada una probabilidad α que cubre los casos de operación menos favorables o los escenarios más catastróficos, el VaR_α proporciona una cota inferior para los beneficios en los casos no catastróficos, es decir, en $(1 - \alpha)100\%$ de los casos los beneficios superan al VaR_α . El mecanismo se puede implementar en modelos de optimización estocástica según:

$$\max VaR \quad (2.5)$$

$$s. a \quad Ax = b \quad (2.6)$$

$$T^w x + W y^w = h^w \quad \forall w \in \Omega \quad (2.7)$$

$$c^T x + q^{w^T} y^w + M_w V_w \geq VaR_\alpha \quad \forall w \in \Omega \quad (2.8)$$

$$\sum_{w \in \Omega} W^w V_w \leq \alpha \quad (2.9)$$

$$x, y^w \geq 0 \quad \forall w \in \Omega \quad (2.10)$$

$$V_w \in \{0,1\} \quad \forall w \in \Omega \quad (2.11)$$

Donde ρ representa el componente de aversión al riesgo, x representa las variables de primera etapa, y^w y V_w son variables de segunda etapa y W^w representa la probabilidad

de cada escenario. Las ecuaciones (2.5)–(2.7) representan el modelo clásico de optimización estocástica de dos etapas. La ecuación (2.8) garantiza que la utilidad esperada en algunos escenarios sea siempre mayor al VaR_α , donde M_w es una “*Big-M*” que permite relajar la restricción anterior para algunos casos. La ecuación (2.9) es para que la probabilidad que abarquen los escenarios en que se relaja la ecuación (2.8) no supere a α .

Como una mejora del VaR, posteriormente se propone el “Conditional Value at Risk” (CVaR) que se utiliza para minimizar el valor esperado de los costos en el $(1 - \alpha) \cdot 100\%$ peores casos (Rockafellar & Uryasev, 2000; Namdar et al., 2017; Lee & Moon, 2024). Los autores Schultz & Tiedemann (2006) proponen un modelo general para implementar el CVaR en modelos de optimización estocástica de dos etapas para maximizar beneficios, ver modelo (2.12)–(2.18). Alternativamente, Kazemzadeh y Hu (2013) utilizan el CVaR en una planificación de cadena de suministros para maximizar beneficios, en ese caso, el CVaR se utiliza para para mejorar los beneficios en los escenarios menos favorables.

$$\max \Gamma + \frac{1}{\alpha} \sum_{w \in \Omega} W^w V_w \quad (2.12)$$

$$s. a \quad Ax = b \quad (2.13)$$

$$T^w x + W y^w = h^w \quad \forall w \in \Omega \quad (2.14)$$

$$c^T x + q^{w^T} y^w + Z_w \geq \Gamma \quad \forall w \in \Omega \quad (2.15)$$

$$x, y^w \geq 0 \quad \forall w \in \Omega \quad (2.16)$$

$$\Gamma, Z_w \geq 0 \quad \forall w \in \Omega \quad (2.17)$$

$$\Gamma \in R_+ \quad (2.18)$$

El modelo agrega dos variables auxiliares, Z_w como desviación de los beneficios por debajo de la variable Γ . El CVaR ha sido utilizado en agricultura, Filippi et al. (2017) propone un modelo de optimización estocástica en que maximiza el CVaR para potenciar el beneficio esperado bajo el percentil de las peores realizaciones. Por otra parte, Lee y Moon (2024) lo usan para minimizar costos en escenarios más disruptivos. Alonso-Ayuso et al., (2018), en el contexto de gestión forestal, muestran alteraciones del CVaR, primero acota los beneficios esperados de los peores escenarios solo en períodos definidos, lo bautizan como TCVaR, después aplica el CVaR pero acotado a un conjunto de escenarios específicos, lo cual definen como EVCVaR.

Finalmente, Schultz y Tiedemann (2003) proponen otra medida de gestión del riesgo aplicable en modelos de programación estocástica que, en lugar de solo considerar un costo esperado, también minimiza la probabilidad de que los costos excedan un umbral preseleccionado, el modelo general corresponde a:

$$\text{Max } \sum_{w \in \Omega} W^w V^w \quad (2.19)$$

$$s. a \quad Ax = b \quad (2.20)$$

$$T^w x + W y^w = h^w \quad \forall w \in \Omega \quad (2.21)$$

$$c^T x + q^{w^T} y^w + M_w V_w \geq C \quad \forall w \in \Omega \quad (2.22)$$

$$x, y^w \geq 0 \quad \forall w \in \Omega \quad (2.23)$$

$$V_w \in \{0,1\} \quad \forall w \in \Omega \quad (2.24)$$

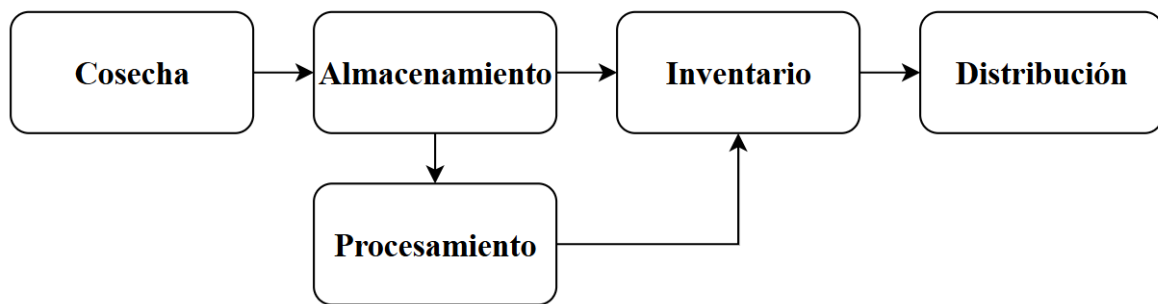
Donde C es el umbral de costos preseleccionados.

METODOLOGÍA

En esta sección, se presenta un enfoque de modelamiento de optimización para una cadena de suministro de fruta fresca con el objetivo de contribuir a la gestión eficiente de la planificación, el procesamiento y la distribución de la cosecha en un esquema integrado bajo condiciones de incertidumbre. Primero, se introduce un modelo determinista que posteriormente se extiende a un modelo de optimización estocástica con recurso, con un conjunto finito de escenarios de precios e interrupciones en la logística de distribución a los distribuidores mayoristas. Enseguida, se extiende el modelo neutral al riesgo previo, considerando un par de formulaciones que integran medidas de riesgo: *CVaR* y *MOTAD*.

El problema modelado se resume en la Figura 3.1. Comienza con la programación de la cosecha basada en una partición del campo compuesta por zonas de manejo rectangulares que permiten obtener la mejor calidad de la fruta en un período determinado del horizonte de planificación para cada zona. Un requisito importante es que la fruta cosechada mantenga una vida útil después del transporte para satisfacer la demanda de los clientes ubicados geográficamente en diferentes latitudes. Para prolongar la vida útil, la fruta puede procesarse durante el horizonte de planificación con un método de recubrimiento y almacenarse hasta que comience el envío. Al final del horizonte de cosecha, la fruta fresca debe enviarse a cada distribuidor mayorista distribuido en diferentes países.

Figura 3.1 Cadena de suministro modelada



Nota. Figura de elaboración propia.

Los modelos propuestos consideran varios supuestos. Se asume que la calidad de la uva disminuye linealmente a lo largo del horizonte de planificación, lo que significa que la fruta pierde su mismo nivel de calidad cada día. Un aumento en la vida útil, debido al proceso de recubrimiento, se modela como una mejora en la calidad de la uva, lo que permite que dure más. Se asume que, cuando la uva se vende con una calidad insuficiente, el precio es proporcional a la calidad alcanzada, como muestran las ecuaciones (3.41) y (3.42). La gravedad de las interrupciones se modela como un valor entre 0 y 1 que, al multiplicarse por el plazo de entrega, modela un aumento en la demora en el viaje desde el puerto hasta el país de destino, como se observa en las ecuaciones (3.44) y (3.50). Además, siempre que se cosecha en cualquier período, el nivel de vida útil se establece en 1, lo que corresponde a una cantidad de días según la fruta transportada.

Formulación Determinista

Se propone una formulación determinista para modelar la cadena de suministro agrícola. El modelo propuesto maximiza la utilidad total considerando los costos de cosecha,

procesamiento y distribución, e incluye también los saldos de inventario, la escasez de recursos y los niveles de calidad de los productos enviados a cada cliente en función de su vida útil en destino. Los conjuntos, índices, parámetros y variables se describen a continuación:

Conjuntos

Z = zonas potenciales de manejo, indexado $z \in Z$.

S = puntos muestrales de una propiedad del cultivo en el campo, indexado $m \in S$.

T = horizonte de planificación en días, indexado $t \in T$.

C = conjunto de clientes, indexado $c \in C$.

P = conjunto de embarcaciones, indexado $p \in P$.

Parámetros

$a_{z,m}$ = parámetro binario igual a 1 si punto muestral m pertenece a zona de manejo z , 0 en otro caso.

n_z = número de puntos muestrales en zona potencial de manejo z .

n_s = número de puntos muestrales en el campo.

σ_{total}^2 = varianza de la propiedad utilizada en todo el campo.

σ_z^2 = varianza de la propiedad utilizada en la zona potencial z .

α = nivel de homogeneidad requerida.

cm_z = costo de elección de la zona z .

th_z = periodo inicial de cosecha para zona potencial z .

thf_z = periodo final de cosecha para zona potencial z .

tf = final de la temporada de cosecha.

p_z = producción de zona z .

$b_{z,t}$ = parámetro binario de idoneidad, toma el valor 1 si se puede cosechar huerto z en periodo t , 0 en otro caso.

δ = tasa de merma de producto perecible en huertos.

β = tasa de merma de producto perecible cosechado sin procesar.

γ = tasa de merma de producto perecible cosechado procesado.

qu = tasa de perecibilidad.

sp = costo de trabajadores permanentes (salario).

st = costo de trabajadores temporales (pago diario).

$twmax$ = cantidad máxima de trabajadores temporales.

$cpmax$ = kilogramos de capacidad máxima de procesamiento por día.

pc = costo unitario de procesar frutas.

pp = productividad de trabajadores permanentes.

pt = productividad de trabajadores temporales.

$imax$ = capacidad de inventario máximo.

ic = costo unitario de inventario.

tc_z = costo de transporte a zona potencial z .

tt_z = tiempo de transporte a zona potencial z , en horas.

ta_t = tiempo disponible para viajar en periodo t , en horas.

$vcmax$ = capacidad vehicular máxima.

dem_c = demanda de cliente/país c en kilogramos de producto.

qc_c = vida útil necesaria para llegar a cliente c .

$av_{p,c}$ = parámetro binario que toma el valor 1 si embarcación p puede abastecer cliente c , 0 en otro caso.

ps_c = beneficio unitario de exportaciones vendidas a precio óptimo al cliente c .

sa = aumento de vida útil de la fruta debido a procesamiento.

$qsu_{t,d}$ = nivel de vida útil restante de fruta en periodo t , dado que fue cosechada en periodo d . Se modela de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$qsu_{t,d} = 1 - qu(t - d) \quad (3.1)$$

$qsp_{t,d,s}$ = nivel de vida útil restante de fruta en periodo t , dado que fue cosechada en periodo d y procesada en periodo s . Se modela con la siguiente ecuación:

$$qsp_{t,d,s} = [1 - qu(s - d)] + sa - qp(t - s) \quad (3.2)$$

Variables

Q_z = variable binaria igual a 1 si se utiliza zona de manejo potencial z , 0 en otro caso.

$XU_{z,t,c}$ = total [kg] de producto cosechado de zona z en periodo t para satisfacer demanda de cliente c con unidades sin procesar.

$XP_{z,t,c}$ = total [kg] de producto cosechado de zona z en periodo t para satisfacer demanda de cliente c con unidades procesadas.

$Y_{z,t}$ = total [kg] de producto en zona z al final de periodo t disponible para cosechar.

$NT_{z,t}$ = número de viajes para transportar fruta cosechada en zona z en periodo t .

PW = cantidad de trabajadores permanentes.

TW_t = cantidad de trabajadores temporales en periodo t .

CTW_t = cantidad de trabajadores temporales contratados al inicio de periodo t .

HTW_t = cantidad de trabajadores temporales despedidos al final del periodo t .

$PP_{t,d,c}$ = total [kg] de producto procesado en periodo t para satisfacer demanda de cliente c cosechado en periodo d .

$IUP_{t,d,c}$ = total [kg] de inventario en periodo t de fruta sin procesar cosechada en periodo d para satisfacer demanda de cliente c .

$ITP_{t,d,c}$ = total [kg] de inventario en periodo t de fruta a procesar cosechada en periodo d para satisfacer demanda de cliente c .

$IPP_{t,d,s,c}$ = total [kg] de inventario en periodo t de fruta cosechada en periodo d , procesado en periodo s , para satisfacer demanda de cliente c .

$SP_{p,d,s,c}$ = total [kg] de fruta cosechada en periodo d procesado en periodo s utilizada para satisfacer demanda de cliente c a través de puerto p .

$SU_{p,d,c}$ = total [kg] de fruta cosechada en periodo d sin procesar utilizado para satisfacer demanda de cliente c a través de puerto p .

$CR_{p,c}$ = capacidad reservada en puerto p para satisfacer demanda de cliente c .

$CT_{p,c}$ = variable binaria de contratación, 1 si se reserva capacidad en puerto p para satisfacer demanda de cliente c , 0 en otro caso.

El modelo de programación lineal determinista entero mixto para el problema de cosecha y distribución de fruta fresca corresponde a:

$$\begin{aligned}
 \max \quad & \sum_{p \in P} \sum_{c \in C} \sum_{d \in T} p s_c \left(S U_{p,d,c} + \sum_{s \in T} S P_{p,d,s,c} \right) - \sum_{t \in T} \sum_{d \in T} \sum_{c \in C} p c P P_{t,d,c} \\
 & - \sum_{t \in T} \sum_{z \in Z} t c_z N T_z - s p P W - \sum_{t \in T} s t T W_t - \sum_{z \in Z} c m_z Q_z \\
 & - \sum_{t \in T} \sum_{d \in T} \sum_{c \in C} i c \left(I U P_{t,d,c} + I T P_{t,d,c} + \sum_{s \in T} I P P_{t,d,s,c} \right)
 \end{aligned} \tag{3.3}$$

s.a.

$$\sum_{z \in Z} a_{z,m} Q_z = 1 \quad \forall m \in S \tag{3.4}$$

$$\sum_{z \in Z} [(n_z - 1) \sigma_z^2 + (1 - \alpha) \sigma_{total}^2] Q_z \leq (1 - \alpha) \sigma_{total}^2 n s \tag{3.5}$$

$$Y_{z,t} = 0 \quad \forall z \in Z, \forall t < t h_z \tag{3.6}$$

$$Y_{z,t} = 0 \quad \forall z \in Z, \forall t > t f_z \tag{3.7}$$

$$Y_{z,th_z} = p_z Q_z - \sum_{c \in C} (X U_{z,th_z,c} + X P_{z,th_z,c}) \quad \forall z \in Z \tag{3.8}$$

$$Y_{z,t} = Y_{z,t-1} (1 - \delta) - \sum_{c \in C} (X U_{z,t,c} + X P_{z,t,c}) \quad \forall z \in Z, t h_z < t \leq t f_z \tag{3.9}$$

$$\sum_{c \in C} (X U_{z,t,c} + X P_{z,t,c}) \leq p_z Q_z b_{z,t} \quad \forall z \in Z, \forall t \in T \tag{3.10}$$

$$\sum_{z \in Z} \sum_{c \in C} (X U_{z,t,c} + X P_{z,t,c}) \leq p p P W + p t T W_t \quad \forall t \in T \tag{3.11}$$

$$T W_t = T W_{t-1} - H T W_{t-1} + C T W_t \quad \forall t \in T \tag{3.12}$$

$$T W_t \leq t w m a x \quad \forall t \in T \tag{3.13}$$

$$T W_0 = 0 \tag{3.14}$$

$$H T W_0 = 0 \tag{3.15}$$

$$IUP_{t,t,c} = \sum_{z \in Z} XU_{z,t,c} \quad \forall t \in T, \forall c \in C \quad (3.16)$$

$$IUP_{t,d,c} = IUP_{t-1,d,c}(1 - \beta) \quad \forall t \in T, \forall d \in T, \forall c \in C: t > d \quad (3.17)$$

$$IUP_{t,d,c} = 0 \quad \forall t \in T, \forall d \in T, \forall c \in C: t < d \quad (3.18)$$

$$\sum_{p \in P} SU_{p,d,c} = IUP_{t,d,c} \quad \forall d \in T, \forall c \in C \quad (3.19)$$

$$qsu_{tl,d} IUP_{tl,d,c} \geq qc IUP_{tl,d,c} \quad \forall d \in T, \forall c \in C \quad (3.20)$$

$$ITP_{t,t,c} = \sum_{z \in Z} XP_{z,t,c} - PP_{t,t,c} \quad \forall t \in T, \forall c \in C \quad (3.21)$$

$$ITP_{t,d,c} = ITP_{t-1,d,c}(1 - \beta) - PP_{t,d,c} \quad \forall t \in T, \forall d \in T, \forall c \in C: t > d \quad (3.22)$$

$$ITP_{t,d,c} = 0 \quad \forall t \in T, \forall d \in T, \forall c \in C: t < d \quad (3.23)$$

$$IPP_{t,d,t,c} = PP_{t,d,c} \quad \forall t \in T, \forall d \in T, \forall c \in C \quad (3.24)$$

$$IPP_{t,d,s,c} = IPP_{t-1,s,d,c}(1 - \gamma) \quad \forall t \in T, \forall d \in T, \forall s \in T, \forall c \in C: t > s \quad (3.25)$$

$$IPP_{t,d,s,c} = 0 \quad \forall t \in T, \forall d \in T, \forall s \in T, \forall c \in C: t < s \quad (3.26)$$

$$\sum_{p \in P} SP_{p,d,s,c} = IPP_{t,d,s,c} \quad \forall d \in T, \forall s \in T, \forall c \in C \quad (3.27)$$

$$qsp_{tl,d,s,c} IPP_{tl,d,s,c} \geq qc_c IPP_{tl,d,s,c} \quad \forall d \in T, \forall s \in T, \forall c \in C \quad (3.28)$$

$$\sum_{d \in T} \sum_{c \in C} IUP_{t,d,c} + \sum_{d \in T} \sum_{c \in C} ITP_{t,d,c} + \sum_{d \in T} \sum_{s \in T} \sum_{c \in C} IPP_{t,d,s,c} \leq imax \quad \forall t \in T \quad (3.29)$$

$$\sum_{d \in T} \sum_{c \in C} PP_{t,d,c} \leq cpmax \quad \forall t \in T \quad (3.30)$$

$$PP_{t,d,c} = 0 \quad \forall t \in T, \forall d \in T, \forall c \in C: t < d \quad (3.31)$$

$$\sum_{c \in C} (XU_{z,t,c} + XP_{z,t,c}) \leq NT_{z,t} vcmax \quad \forall z \in Z, \forall t \in T \quad (3.32)$$

$$\sum_{z \in Z} tt_z NT_{z,t} \leq ta_t \quad \forall t \in T \quad (3.33)$$

$$\sum_{p \in P} CT_{p,c} = 1 \quad \forall c \in C \quad (3.34)$$

$$\sum_{d \in T} SU_{p,d,c} + \sum_{d \in T} \sum_{s \in T} SP_{p,d,s,c} = dem_c CT_{p,c} \quad \forall p \in P, \forall c \in C \quad (3.35)$$

$$CT_{p,c} \leq av_{p,c} \quad \forall p \in P, \forall c \in C \quad (3.36)$$

$$\sum_{d \in T} SU_{p,d,c} + \sum_{d \in T} \sum_{s \in T} SP_{p,d,s,c} = CR_{p,c} \quad \forall p \in P, \forall c \in C \quad (3.37)$$

$$XU_{z,t,c}, XP_{z,t,c}, Y_{z,t}, PP_{t,d,c}, IUP_{t,d,c}, ITP_{t,d,c}, IPP_{t,d,s,c}, SP_{p,d,s,c}, \quad (3.38)$$

$$SU_{p,d,c}, CR_{p,c} \in R_+$$

$$NT_{z,t}, PW, TW_t, CW_t, HTW_t \in Z_+ \quad (3.39)$$

$$Q_z, CT_{p,c} \in \{0,1\} \quad (3.40)$$

La función objetivo (3.3) representa los beneficios a maximizar por parte del tomador de decisiones. Se calcula como la diferencia entre los ingresos recibidos de cada cliente y los costos asociados a mano de obra, transporte, procesamiento, gestión de zonas de manejo e inventario. Con la restricción (3.4) se asegura una partición del predio, mientras que la ecuación (3.5) garantiza un nivel mínimo de homogeneidad relativa requerido. Las ecuaciones (3.6) y (3.7) garantizan que no exista cosecha disponible fuera del horizonte definido por los parámetros th_z y tf_z para cada zona. La ecuación (3.8) asigna la producción total disponible por cosechar durante el horizonte de planificación. La restricción (3.9) realiza un balance entre los cultivos por zona y la cosecha del periodo, también considera una tasa de merma para modelar perecibilidad en los huertos. La ecuación (3.10) limita los productos cosechados a procesar y sin procesar a la ventana de cosecha definida. La restricción (3.11)

limita el volumen de los productos cosechados al rendimiento de los trabajadores contratados para el periodo, considera trabajadores temporales y permanentes. La ecuación (3.12) presenta un balance para los trabajadores temporales, considera variables de contratación y despido, la ecuación (3.13) pone límite a la contratación diaria de trabajadores temporales. Las ecuaciones (3.14) y (3.15) definen la cantidad de trabajadores temporales y los despedidos al inicio del horizonte de planificación.

Las restricciones (3.16), (3.17) y (3.18) realizan un balance de inventario para para producto cosechado sin procesar, mientras que la ecuación (3.19) define el stock sin procesar a distribuir en distintas embarcaciones para abastecer las demandas, en función del inventario sin procesar al final del horizonte de cosecha. La ecuación (3.20) garantiza que el inventario sin procesar debe tener un nivel de calidad o integridad necesario para llegar en buen estado al cliente respectivo. Las ecuaciones (3.21), (3.22) y (3.23) definen el balance de inventario respectivo para el inventario a procesar.

Las restricciones (3.24), (3.25) y (3.26) establecen el balance de inventario para productos procesados, la ecuación (3.27) define el stock procesado a distribuir en distintas embarcaciones, igual al inventario procesado al final del horizonte de cosecha. La ecuación (3.28) garantiza que el inventario procesado debe tener un nivel de calidad o integridad necesario para llegar en buen estado al cliente respectivo.

La ecuación (3.29) limita en inventario en cada periodo de planificación con un nivel máximo. De manera similar, la restricción (3.30) limita el producto procesado según una capacidad fija por periodo. La restricción (3.31), como es lógico, impone que no se puede procesar fruta antes de su cosecha.

La restricción (3.32) limita la cosecha en cada zona para todos los periodos según la

cantidad de viajes que se realicen a la zona y la capacidad vehicular, al mismo tiempo, la restricción (3.33) limita los viajes realizados a cada zona en cada periodo según las horas disponibles para realizar viajes en cada periodo.

La restricción (3.34) impone que solo se reserva capacidad en embarcaciones para abastecer a todos los clientes a través de solo una embarcación. La ecuación (3.35) garantiza el abastecimiento de la demanda a través del stock con y sin procesar. La restricción (3.36) asegura que solo se pueda abastecer un cliente con una embarcación si el servicio existe, mientras que la restricción (3.37) se utiliza para definir la variable de capacidad reservada en cada embarcación. Finalmente, con las restricciones (3.38), (3.39) y (3.40) definen la naturaleza de las variables.

Formulación Estocástica

En esta sección, se propone un modelo de optimización estocástica con recurso de dos etapas, que extiende el modelo determinista mediante la inclusión explícita de variables aleatorias en sus parámetros. El modelo estocástico proporciona una solución óptima con variables de decisión, denominadas decisiones de primera etapa o inmediatas, cuyo valor es anterior a la realización de los parámetros aleatorios, y variables de decisión, denominadas variables de segunda etapa o con recurso, cuyo valor se adopta en respuesta a la decisión de las variables inmediatas y a una realización específica de los parámetros aleatorios (escenario), lo que permite la flexibilidad necesaria para el modelo propuesto. Las decisiones de primera etapa se refieren principalmente a la planificación de la cosecha, el procesamiento, los envíos y la reserva de capacidad portuaria. Por otro lado, las decisiones de segunda etapa definen la cantidad de fruta exportada que podrá obtener el mejor precio y el precio

penalizado por deficiencias de calidad, bajo incertidumbres en los precios de venta y las operaciones logísticas portuarias que afectan los tiempos de viaje y los precios de venta de la fruta exportada. Los parámetros señalados se incluyen en el modelo como un conjunto finito de escenarios. A continuación, se describen los nuevos conjuntos, índices, parámetros y variables.

Conjuntos Adicionales

W = conjunto de escenarios, indexado $w \in W$

Parámetros Adicionales

$days_c$ = Días de vida útil necesarios para abastecer cliente c con calidad necesaria.

qu = factor de conversión para días de vida útil necesaria a factor de calidad usado.

π_w = probabilidad del escenario w .

$ps_{c,w}$ = beneficio por [kg] de exportaciones vendidas a precio óptimo para el cliente c en escenario w .

$rq_{p,w}$ = Factor de retraso o ineficiencias logísticas por puerto p en escenario w .

$pmu_{p,d,c,w}$ = beneficio por [kg] de exportaciones, proporcional a calidad cumplida para el cliente c por puerto p en escenario w , cosechadas en periodo d .

$$pmu_{p,d,c,w} = \frac{qsu_{t,d} - rq_{p,w}days_c qu}{qc_c} ps_{c,w} \quad (3.41)$$

$pmp_{p,d,s,c,w}$ = beneficio por [kg] de exportaciones, proporcional a calidad cumplida para el cliente c por puerto p en escenario w , cosechadas en periodo d procesadas en periodo s .

$$pmp_{p,d,s,c,w} = \frac{qsp_{t,d,s} - rq_{p,w}days_c qu}{qc_c} ps_{c,w} \quad (3.42)$$

Variables Adicionales

$SHIPU_{p,d,c,w}$ = total [kg] de producto cosechado en periodo d sin procesar, embarcado hacia cliente c en escenario w desde el puerto p , vendido a precio normal.

$SHIPP_{p,d,s,c,w}$ = total [kg] de producto cosechado en periodo d procesado en periodo s , embarcado hacia cliente c en escenario w desde el puerto p , vendido a precio normal.

$SMINU_{p,d,c,w}$ = total [kg] de producto cosechado en periodo d sin procesar, embarcado hacia cliente c en escenario w desde el puerto p , vendido a precio penalizado.

$SMINP_{p,d,s,c,w}$ = total [kg] de producto cosechado en periodo d procesado en periodo s , embarcado hacia cliente c en escenario w desde el puerto p , vendido a precio penalizado.

$FQU_{p,d,c,w}$ = variable binaria que toma el valor 1 si carga cosechada en periodo d sin procesar, para abastecer cliente c a través de puerto p , tiene calidad insuficiente en el escenario w

$FQP_{p,d,s,c,w}$ = variable binaria, toma el valor 1 si carga cosechada en periodo d procesada en periodo s , para abastecer cliente c a través de puerto p , tiene calidad insuficiente en el escenario w , 0 en otro caso.

$FAU_{p,d,c,w}$ = variable de recurso que indica la magnitud de déficit de calidad para carga sin procesar, cosechada en periodo d , para abastecer a cliente c a través de puerto p , en escenario w .

$SOU_{p,d,c,w}$ = variable de recurso que indica la magnitud del exceso de calidad para carga sin procesar, cosechada en periodo d , para abastecer a cliente c a través de puerto p , en escenario w .

$FAP_{p,d,s,c,w}$ = variable de recurso que indica la magnitud de déficit de calidad para

carga procesada en periodo s , cosechada en periodo d , para abastecer a cliente c a través de puerto p , en escenario w .

$SOP_{p,d,s,c,w}$ = variable de recurso que indica la magnitud del exceso de calidad para carga procesada en periodo s , cosechada en periodo d , para abastecer a cliente c a través de puerto p , en escenario w .

$MD_{c,w}$ = total [kg] de demanda satisfecha para el cliente c en el escenario w con calidad suficiente.

$UD_{c,w}$ = total [kg] de demanda satisfecha para el cliente c en el escenario w con calidad insuficiente.

El modelo de optimización estocástica de dos etapas entero mixto para el problema de cosecha y distribución de fruta fresca corresponde a:

$$\begin{aligned}
 \max \sum_{w \in W} \pi_w [& \sum_{p \in P} \sum_{c \in C} \sum_{d \in T} ps_{c,w} (SHIPU_{p,d,c,w} + \sum_{s \in T} SHIPP_{p,d,s,c,w}) \\
 & + \sum_{p \in P} \sum_{c \in C} \sum_{d \in T} (SMINU_{p,d,c,w} pmu_{p,d,c,w} \\
 & + \sum_{s \in T} SMINP_{p,d,s,c,w} pmp_{p,d,s,c,w})] - \sum_{t \in T} \sum_{d \in T} \sum_{c \in C} pcPP_{t,d,c} \quad (3.43) \\
 & - \sum_{t \in T} \sum_{z \in Z} tc_z NT_z - sp PW - \sum_{t \in T} stTW_t - \sum_{z \in Z} cm_z Q_z \\
 & - \sum_{t \in T} \sum_{d \in T} \sum_{c \in C} ic \left(IUP_{t,d,c} + ITP_{t,d,c} + \sum_{s \in T} IPP_{t,d,s,c} \right)
 \end{aligned}$$

s.a.

Ecuaciones (3.4)– (3.40)

$$\begin{aligned}
& (qsu_{tl,d} - rq_{p,w} day_c qu) SU_{p,d,c} + FAU_{p,d,c,w} - SOU_{p,d,c,w} \\
& = qc_c SU_{p,d,c} \quad \forall p \in P, d \in T, \forall c \in C, \forall w \in W
\end{aligned} \tag{3.44}$$

$$FAU_{p,d,c,w} \leq FQU_{p,d,c,w} dem_c qc_c \quad \forall p \in P, d \in T, \forall c \in C, \forall w \in W \tag{3.45}$$

$$\begin{aligned}
& SOU_{p,d,c,w} \leq (1 - FQU_{p,d,c,w}) dem_c (1 - \\
& qc_c) \quad \forall p \in P, d \in T, \forall c \in C, \forall w \in W
\end{aligned} \tag{3.46}$$

$$SHIPU_{p,d,c,w} + SMINU_{p,d,c,w} = SU_{p,d,c} \quad \forall p \in P, d \in T, \forall c \in C, \forall w \in W \tag{3.47}$$

$$SHIPU_{p,d,c,w} \leq (1 - FQU_{p,d,c,w}) dem_c \quad \forall p \in P, d \in T, \forall c \in C, \forall w \in W \tag{3.48}$$

$$SMINU_{p,d,c,w} \leq FQU_{p,d,c,w} dem_c \quad \forall p \in P, d \in T, \forall c \in C, \forall w \in W \tag{3.49}$$

$$\begin{aligned}
& (qsp_{tl,d,s} - rq_{p,w} day_c qu) SP_{p,d,s,c} + FAP_{p,d,s,c,w} - SOP_{p,d,s,c,w} \\
& = qc_c SP_{p,d,s,c} \quad \forall p \in P, d \in T, \forall s \in T, \forall c \in C, \forall w \in W
\end{aligned} \tag{3.50}$$

$$FAP_{p,d,s,c,w} \leq FQP_{p,d,s,c,w} dem_c qc_c \quad \forall p \in P, d \in T, \forall s \in T, \forall c \in C, \forall w \in W \tag{3.51}$$

$$\begin{aligned}
& SOP_{p,d,s,c,w} \leq (1 - FQP_{p,d,s,c,w}) dem_c (1 + sa \\
& - qc_c) \quad \forall p \in P, d \in T, \forall s \in T, \forall c \in C, \forall w \in W
\end{aligned} \tag{3.52}$$

$$\begin{aligned}
& SMINP_{p,d,s,c,w} + SHIPP_{p,d,s,c,w} \\
& = SP_{p,d,s,c} \quad \forall p \in P, d \in T, \forall s \in T, \forall c \in C, \forall w \in W
\end{aligned} \tag{3.53}$$

$$\begin{aligned}
& SHIPP_{p,d,s,c,w} \leq (1 \\
& - FQP_{p,d,s,c,w}) dem_c \quad \forall p \in P, d \in T, \forall s \in T, \forall c \in C, \forall w \in W
\end{aligned} \tag{3.54}$$

$$SMINP_{p,d,s,c,w} \leq FQP_{p,d,s,c,w} dem_c \quad \forall p \in P, d \in T, \forall s \in T, \forall c \in C, \forall w \in W \tag{3.55}$$

$$\begin{aligned}
MD_{c,w} &= \sum_{p \in P} \sum_{d \in T} \sum_{s \in T} SHIPP_{p,d,s,c,w} \\
&+ \sum_{p \in P} \sum_{d \in T} SHIPU_{p,d,c,w} \quad \forall c \in C, \forall w \in W
\end{aligned} \tag{3.56}$$

$$MD_{c,w} + UD_{c,w} = dem_c \quad \forall c \in C, \forall w \in W \quad (3.57)$$

$$SHIPU_{p,d,c,w}, SHIPP_{p,d,s,c,w}, MINU_{p,d,c,w}, MINP_{p,d,s,c,w}, \quad (3.58)$$

$$FAU_{p,d,c,w}, SOU_{p,d,c,w}, FAP_{p,d,s,c,w}, SOP_{p,d,s,c,w}, MD_{c,w}, UD_{c,w} \in R_+$$

$$FQU_{p,d,c,w}, FQP_{p,d,s,c,w} \in \{0,1\} \quad (3.59)$$

La función objetivo, definida por la ecuación (3.43), representa los beneficios esperados a maximizar. En esta formulación, los ingresos recibidos de cada cliente y por cada escenario dependen de la calidad del producto entregado. La restricción (3.44) genera un balance entre la integridad de la fruta requerida para cada demanda de exportación y la integridad del inventario sin procesar en cada escenario, se utilizan variables de recurso que muestran un déficit ($FAU_{p,d,c,w}$) o un exceso ($SOU_{p,d,c,w}$) del producto entre la integridad estimada por los kilos en stock, esta ecuación funciona en conjunto con (3.45) y (3.46). En caso de que el recurso faltante toma un valor positivo, entonces se activa la variable binaria que indica si existe un déficit de calidad para exportaciones sin procesar ($FQU_{p,d,c,w}$). Las ecuaciones (3.47), (3.48) y (3.49) modelan la división de exportaciones que se venden a precio óptimo ($SHIPU_{p,d,c,w}$) y las que se venden con un precio penalizado ($MINU_{p,d,c,w}$) en función el nivel de calidad cumplida.

De manera análoga al stock sin procesar, la restricción (3.50) genera un balance entre la integridad de la fruta requerida para cada demanda de exportación y la integridad del inventario procesado en cada escenario, nuevamente, se utilizan variables de recurso que muestran un déficit ($FAP_{p,d,s,c,w}$) o un exceso ($SOP_{p,d,s,c,w}$) del producto entre la integridad estimada por los kilos en stock, esta ecuación funciona en conjunto con (3.51) y (3.52). Igual que antes, en caso de que el recurso faltante toma un valor positivo, entonces se activa la

variable binaria que indica si existe un déficit de calidad para exportaciones procesadas ($FQP_{p,d,s,c,w}$). Las ecuaciones (3.53), (3.54) y (3.55) modelan la división de exportaciones que se venden a precio óptimo ($SHIPP_{p,d,s,c,w}$) y las que se venden con un precio penalizado ($SMINP_{p,d,s,c,w}$).

Las ecuaciones (3.56) y (3.57) se utilizan para definir la demanda insatisfecha, entendida como la cantidad de demanda que se suple con fruta de calidad insuficiente. Las restricciones (3.58) y (3.59) se utilizan para declarar la naturaleza de las variables.

Modelos que integran Aversión al Riesgo

Para simplificar la notación de los modelos aversos al riesgo, se definen las siguientes variables auxiliares: $EXPECTED_{PROFIT}$ definida como el beneficio esperado de las operaciones planificadas por el tomador de decisiones y $PROFIT_w$ definida como el beneficio por escenario.

$$\begin{aligned}
 EXPECTED_{PROFIT} = & - \sum_{t \in T} \sum_{d \in T} \sum_{c \in C} pc PP_{t,d,c} - \sum_{t \in T} \sum_{z \in Z} tc_z NT_z - sp PW - \sum_{t \in T} st TW_t \\
 & - \sum_{z \in Z} cm_z Q_z - \sum_{t \in T} \sum_{d \in T} \sum_{c \in C} ic \left(IUP_{t,d,c} + ITP_{t,d,c} + \sum_{s \in T} IPP_{t,d,s,c} \right) \\
 & + \sum_{w \in W} \pi_w \left[\sum_{p \in P} \sum_{c \in C} \sum_{d \in T} ps_{c,w} (SHIPU_{p,d,c,w} + \sum_{s \in T} SHIPP_{p,d,s,c,w}) \right. \\
 & + \sum_{p \in P} \sum_{c \in C} \sum_{d \in T} (SMINU_{p,d,c,w} pmu_{p,d,c,w} \\
 & \left. + \sum_{s \in T} SMINP_{p,d,s,c,w} pmp_{p,d,s,c,w}) \right]
 \end{aligned} \tag{3.60}$$

$$\begin{aligned}
PROFIT_w = & - \sum_{t \in T} \sum_{d \in T} \sum_{c \in C} pcPP_{t,d,c} - \sum_{t \in T} \sum_{z \in Z} tc_zNT_z - spPW - \sum_{t \in T} stTW_t \\
& - \sum_{z \in Z} cm_zQ_z - \sum_{t \in T} \sum_{d \in T} \sum_{c \in C} ic \left(IUP_{t,d,c} + ITP_{t,d,c} + \sum_{s \in T} IPP_{t,d,s,c} \right) \\
& + \sum_{p \in P} \sum_{c \in C} \sum_{d \in T} ps_{c,w} (SHIPU_{p,d,c,w} + \sum_{s \in T} SHIPP_{p,d,s,c,w}) \\
& + \sum_{p \in P} \sum_{c \in C} \sum_{d \in T} (SMINU_{p,d,c,w} pmu_{p,d,c,w} \\
& + \sum_{s \in T} SMINP_{p,d,s,c,w} pmp_{p,d,s,c,w})
\end{aligned} \tag{3.61}$$

Extensión con CVaR

En primer lugar, la medida de riesgo CVaR se utiliza para maximizar las ganancias en los escenarios más catastróficos. En la definición habitual del *Value at risk* (*VaR*) y el *CVaR* de una función de distribución de costes, se considera la cola del lado derecho de una función de densidad. Sin embargo, dado que se trata de una función de beneficios, se utiliza la cola del lado izquierdo. El $VaR_{1-\varepsilon}$ de una variable aleatoria X representa el valor máximo de x tal que, con una probabilidad de $1 - \varepsilon$, los beneficios serán al menos x . Por otra parte, el $CVaR_{1-\varepsilon}$ es el valor esperado de los beneficios por debajo del umbral x :

$$VaR_{1-\varepsilon}(X) = \max\{x: \Pr(X \geq x) \geq 1 - \varepsilon\} \tag{3.62}$$

$$CVaR_{1-\varepsilon}(X) = E[X \mid X \leq VaR_{1-\varepsilon}] \tag{3.63}$$

Para una distribución de beneficios discreta, la siguiente expresión de $CVaR_{1-\varepsilon}$ es más útil:

$$CVaR_{1-\varepsilon}(X) = \max_x \left\{ x - \frac{1}{\varepsilon} E[(x - X)_+] \right\} \tag{3.64}$$

De lo anterior se puede deducir una implementación de *CVaR* para el problema

modelado integrando un parámetro de aversión al riesgo en el modelo de optimización estocástica que corresponde a:

$$\mathbf{max} \ (1 - \rho) [EXPECTED_{PROFIT}] + \rho \left[\Gamma - \frac{1}{\varepsilon} \sum_{w \in W} \pi_w V_w \right] \quad (3.65)$$

s.a.

Ecuaciones (3.4)– (3.59) exepto (3.41), (3.42) y (3.43)

$$V_w \geq \Gamma - PROFIT_w \quad \forall w \in W \quad (3.66)$$

$$V_w \in R_+ \quad \forall w \in W \quad (3.67)$$

$$\Gamma \in R \quad (3.68)$$

Donde ρ corresponde al coeficiente de aversión al riesgo por parte del tomador de decisiones, ε representa la fracción de peores casos que se trata de controlar aplicando el *CVaR*, que se mueve entre 0 y 1, Γ representa el *Value at risk (VaR)*. Finalmente, V_w es la desviación con respecto a la cola Γ en escenario w . La función objetivo (3.65) maximiza una ponderación entre el beneficio esperado más el *CVaR*.

Extensión con MOTAD

Alternativamente, se propone considerar como medida cuantitativa de gestión del riesgo incluir la media de las desviaciones negativas con respecto al beneficio esperado, tal herramienta es conocida como MOTAD:

$$\mathbf{max} \ (1 - \rho) [EXPECTED_{PROFIT}] - \rho \left[\sum_{w \in W} \pi_w DEV_w \right] \quad (3.66)$$

s.a.

Ecuaciones (3.4)– (3.59) exepto (3.41), (3.42) y (3.43)

$$DEV_w \geq EXPECTED_{PROFIT} - PROFIT_w \quad \forall w \in W \quad (3.67)$$

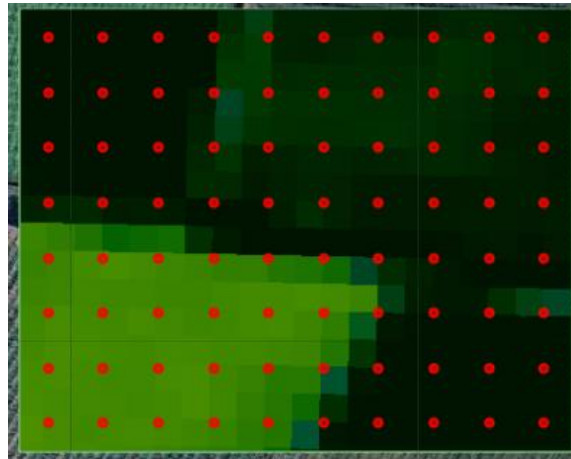
$$DEV_w \in R_+ \quad \forall w \in W \quad (3.68)$$

Donde DEV_w es la desviación del beneficio en el escenario w respecto al beneficio esperado. Si esta desviación es positiva la variable toma el valor 0. La nueva función objetivo descrita con la ecuación (3.66) maximiza una ponderación entre el beneficio menos la desviación negativa esperada.

CASO DE ESTUDIO

Se presenta un caso de estudio con datos de la fruta tomados de una empresa exportadora de uva de mesa con operaciones en la localidad de San Vicente de Tagua Tagua, Región de O'Higgins, Chile. La Figura 4.1 proporciona una referencia para el área analizada mediante el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI). Se considera datos satelitales obtenidos con las herramientas de *Google Earth Engine* (<https://code.earthengine.google.com>) y ejecutando bloques de códigos programados con JavaScript.

Figura 4.1: Referencia de predio rectangular utilizado



Nota. Figura de elaboración propia. La referencia tiene 80 muestras donde se obtiene el NDVI con datos satelitales para construir un caso de estudio.

Para obtener datos referentes a costos de administración y producción en predios de cultivos, se puede acceder a datos publicados por la ODEPA (s.f.-b) donde se estima un promedio 13.174.797 [CLP] por hectárea o 526.992 [CLP] por cada muestra de 400 [m^2] de superficie. En la misma fuente también se estima una producción de 25.500 [kg] de uva fresca por hectárea o 1.020 [kg] por cada muestra de 400 [m^2], ese es un valor promedio de referencia, ya que la producción es variable y tiene una relación positiva con el NDVI (Sun et al., 2017; Arab et al., 2021).

Para estimar la producción se asume una relación positiva y lineal entre la producción del predio y el NDVI, tomando como referencia el comportamiento de estas variables expuesto por Arab et al. (2021) y ajustándolo con datos de producción de uva por hectárea en la región de O'Higgins se construye la ecuación (4.1) para estimar la producción (Y) en cada punto muestral según su valor de NDVI (X).

$$Y = 1.863 X - 0.227 \quad (4.1)$$

De manera similar, con información proporcionada por el servicio nacional de aduanas disponible en una matriz interactiva a través de la ODEPA (s.f.-a) se obtienen los precios de comercialización de la fruta exportada. Como referencia de la vida útil de la uva de mesa, se utiliza la información expuesta en la investigación de Gao et al. (2013). Las demandas se estiman asumiendo que toda la producción se va a comerciar en mercados internacionales usados para exportar uva fresca producida en la región de O'Higgins (ODEPA, s.f.-a), los países de destino se presentan en la tabla 4.1.

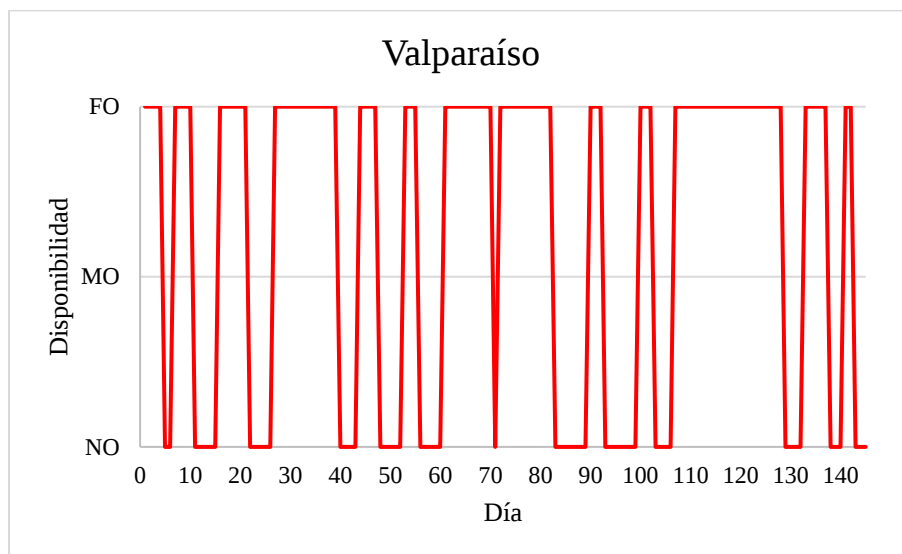
Tabla 4.1: Países destinos de exportación

Destino	Vida útil requerida [día]	Proporción asignada	San Antonio	Valparaíso	San Vicente
Brasil (BR)	30	0.015	0	1	0
Canadá (CA)	33	0.022	1	0	0
China (CH)	45	0.199	1	0	1
Colombia (CO)	25	0.013	1	1	0
Corea del Sur (SK)	60	0.029	0	1	1
Ecuador (EC)	22	0.013	0	1	0
Estados Unidos (US)	31	0.455	1	0	0
Europa (EU)	44	0.243	0	1	0
Japón (JA)	55	0.012	0	0	1

Nota. Tabla de elaboración propia con clientes, vida útil requerida y demanda. Las últimas columnas toman el valor 1 si el puerto puede exportar cargas al país. Fuente: Páginas web de compañías navieras y Servicio de Aduanas de Chile.

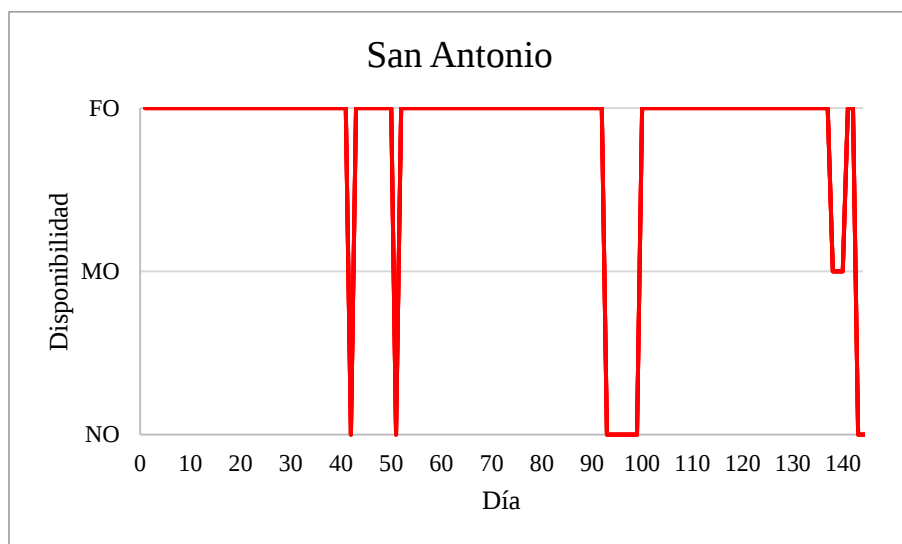
Para entender el comportamiento de la disponibilidad de 3 puertos chilenos usados como referencia (Valparaíso, San Antonio y San Vicente), se hace una revisión del estado de operación de los puertos entre marzo y julio del 2024 (140 días) a través de la información dispuesta por la Armada de Chile. Los resultados se observan en las Figuras 4.2, 4.3 y 4.4, con tres posibles estados operativos: Totalmente Operativo (FO), Capacidad Operacional Media (MO) y No Operacional (NO). Adicionalmente, se estudia la conectividad de cada puerto para definir las posibles conexiones entre puertos y países de destinos, lo obtenido se muestra en la Tabla 4.1.

Figura 4.2: Disponibilidad Observada de Puerto de Valparaíso



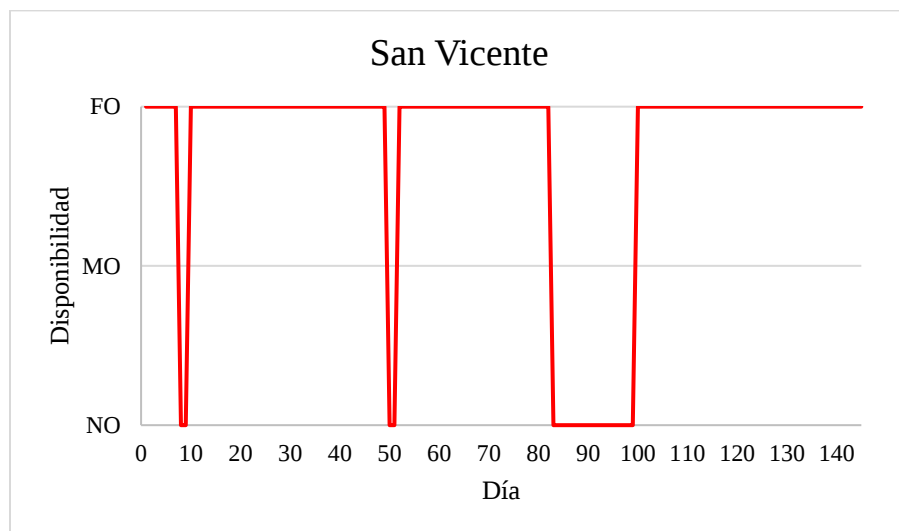
Nota. Gráfico de elaboración propia. Fuente: <https://sitport.directemar.cl>

Figura 4.3: Disponibilidad Observada de Puerto de San Antonio



Nota. Gráfico de elaboración propia. Fuente: <https://sitport.directemar.cl>

Figura 4.4: Disponibilidad Observada de Puerto de San Vicente



Nota. Gráfico de elaboración propia. *Fuente:* <https://sitport.directemar.cl>

Con los antecedentes presentados se utilizan 8 instancias variando la cantidad de muestras utilizadas y, por ende, el tamaño del predio que se utiliza durante la planificación. Para cada instancia se construyen 27 escenarios, considerando casos optimistas y pesimistas para el precio de exportación y severidad de las interrupciones.

RESULTADOS Y ANÁLISIS

En esta sección se presentan distintos experimentos realizados en una computadora con una CPU Intel(R) Core(TM) i5-9300H, una frecuencia base de 2.40 GHz y 8 GB de RAM. El problema se resuelve utilizando AMPL y Gurobi v12.0.0, estableciendo $mipgap = 0,001$, lo que significa que la diferencia entre la mejor solución encontrada por el algoritmo y el límite superior es como máximo del 0,1 %.

La Tabla 5.1 presenta los principales resultados obtenidos al aplicar el modelo de optimización estocástica de dos etapas neutral al riesgo descrito en la sección 3.2 al caso de

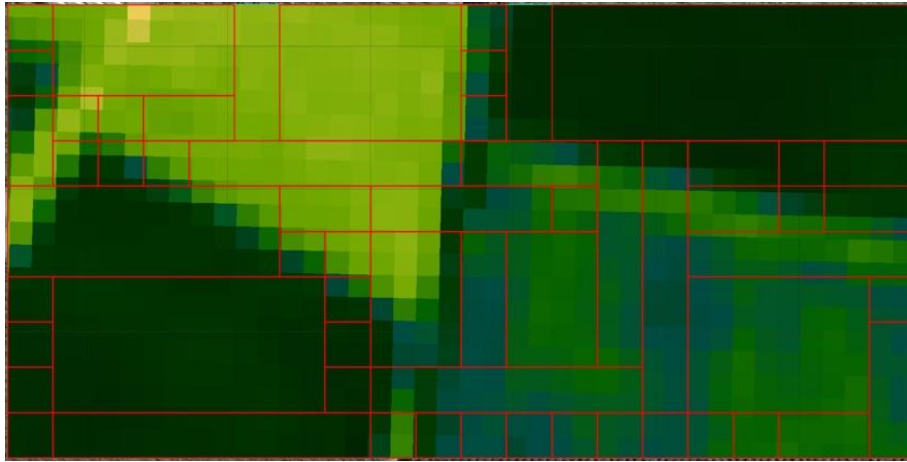
estudio. Las dos primeras columnas presentan el número de la instancia y el número correspondiente de muestras de NDVI considerados, respectivamente. Las columnas tres y cuatro muestran el tamaño del modelo en términos del número de variables y restricciones y las dos últimas columnas indican la ganancia esperada y el tiempo computacional en segundos. Las primeras cinco instancias consideran 14 períodos de cosecha, mientras que las últimas tres instancias consideran 21 períodos. Los resultados muestran que el modelo escala fácilmente en tamaño, determinado por el número de restricciones y variables, y su carga computacional con predios de cultivo más grandes y horizontes de planificación de cosecha más largos.

Tabla 5.1: Resultados del modelo estocástico de 2 etapas neutral al riesgo

Instancia	#Muestras	#Variables	#Restricciones	Beneficio Esperado [\$]	Tiempo de resolución [s]
1	80	1,399,820	1,041,250	11,139,083	215
2	100	1,714,360	1,087,250	22,617,307	442
3	120	2,095,130	1,142,930	32,051,892	315
4	140	2,542,110	1,208,290	39,824,614	983
5	160	3,055,320	1,283,330	48,142,653	894
6	180	5,944,470	2,738,840	41,363,115	2,823
7	200	6,890,410	2,878,290	60,790,309	4,333
8	220	7,933,380	3,032,030	69,201,720	3,979

También es importante destacar que el plan óptimo de cosecha y distribución se basa en la mejor partición del terreno en zonas de manejo propuesta por el modelo mismo. En este caso se apunta a una baja varianza interna del NDVI, como se ilustra en la Figura 5.1, que muestra el resultado del modelo para la Instancia 7 utilizando una varianza relativa $\alpha = 0.8$.

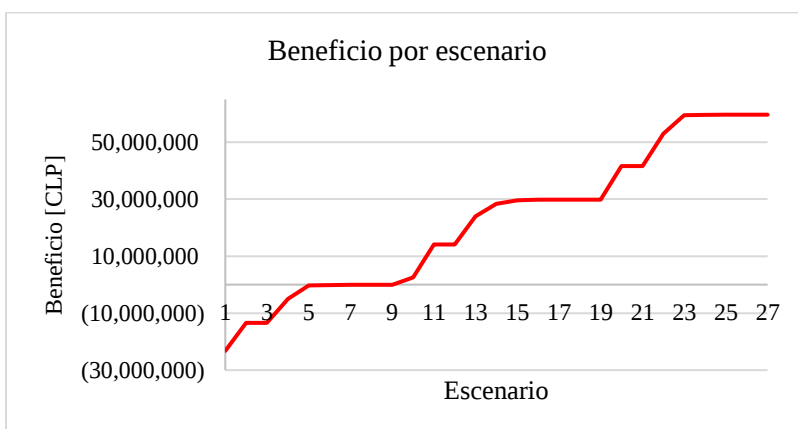
Figura 5.1: zonas de manejo propuestas por el modelo estocástico de 2 etapas



Nota. Figura de elaboración propia.

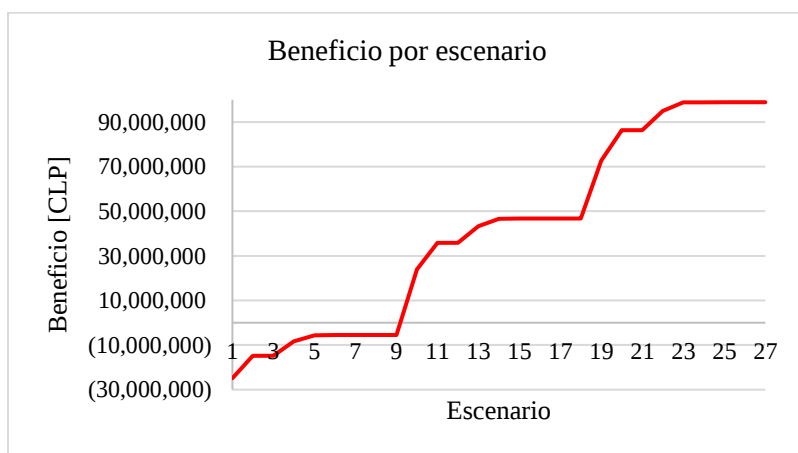
El modelo estocástico de dos etapas maximiza la utilidad esperada al sumar la utilidad de cada escenario ponderada por su probabilidad correspondiente, cuya solución óptima propuesta por el modelo es factible para cada realización de las variables aleatorias. Sin embargo, la ocurrencia de los escenarios más pesimistas podría tener consecuencias catastróficas para el tomador de decisiones. Las Figuras 5.2 y 5.3 muestran la utilidad por escenario para las Instancias 2 y 6 de diferentes tamaños, con 100 y 180 muestras de NDVI respectivamente, cuyas soluciones óptimas generan pérdidas económicas en los escenarios más catastróficos, lo que también motiva la inclusión de medidas de riesgo en el modelo.

Figura 5.2: Beneficio esperado por escenario para Instancia 2



Nota. Se utiliza una instancia en un predio con una extensión de 100 muestras de NDVI.

Figura 5.3: Beneficio esperado por escenario para Instancia 6



Nota. Se utiliza una instancia en un predio con una extensión de 180 muestras de NDVI.

La Tabla 5.2 presenta la asignación de puertos por país de destino para la Instancia 6 de la Tabla 5.1 y se compara el modelo neutral al riesgo con las decisiones propuestas por los modelos aversos al riesgo. Los resultados muestran diferentes asignaciones, pero el puerto más utilizado es San Vicente, que suele estar plenamente operativo durante la temporada de exportación.

Tabla 5.2: La utilización óptima de puertos propuesta para Instancia 6

Puerto	Países destino
<u>Modelo estocástico neutral al riesgo</u>	
San Antonio	CA, CO
Valparaíso	BR, EC
San Vicente	CH, SK, EU, JA, US
<u>CVAR, $\rho = 0.9$, $\varepsilon = 0.111$</u>	
San Antonio	CA, CH, CO, SK
Valparaíso	BR, EC
San Vicente	EU, JA, US
<u>CVAR, $\rho = 0.9$, $\varepsilon = 0.444$</u>	
San Antonio	CA, CH, CO
Valparaíso	BR, EC
San Vicente	SK, EU, JA, US
<u>MOTAD, $\rho = 0.9$</u>	
San Antonio	CA, SK
Valparaíso	BR, CO, EC
San Vicente	CH, EU, JA, US

Nota. Se utiliza una instancia en un predio con una extensión de 180 muestras de NDVI.

Dado que se propone un modelo de programación estocástica con recurso, la necesidad de considerar la incertidumbre puede evaluarse mediante la medida Valor de la Solución Estocástica (VSS), que cuantifica el beneficio de adoptar un enfoque estocástico en lugar de uno determinista en la toma de decisiones. El VSS destaca el valor añadido de considerar la incertidumbre en lugar de basarse únicamente en datos promedio o fijos de los parámetros bajo incertidumbre. La Tabla 5.3 presenta los resultados de VSS para todas las instancias, dado que la magnitud del VSS no tiene una interpretación directa sin contexto, la última columna presenta el VSS como un porcentaje de la solución óptima del problema con variables de recurso, destacando las importantes ganancias obtenidas al incorporar elementos estocásticos en el modelo.

Tabla 5.3: Valor de la solución estocástica

Instancia	#Muestras	VSS [CLP]	VSS/RP
1	80	1,077,058	9.7%
2	100	2,984,757	13.2%
3	120	1,681,330	5.2%
4	140	1,245,590	3.1%
5	160	1,609,889	3.3%
6	180	3,816,865	9.2%
7	200	6,123,927	10.1%
8	220	2,960,834	4.3%

La inclusión de medidas de riesgo en las funciones objetivo de los modelos de aversión al riesgo presentados en la Sección 3 debería modificar la distribución de beneficios. Estos modelos buscan aumentar los beneficios en los peores escenarios, lo que puede reducirlos en escenarios más beneficiosos, dado que recursos como la capacidad de procesamiento de recubrimientos, el inventario y el tiempo de cosecha son limitados. Como se explica en la Sección 3, para probar el rendimiento de los modelos de aversión al riesgo es necesario establecer los valores de ρ , que representa la aversión al riesgo del responsable de la toma de decisiones, y ε , que denota el porcentaje de los peores escenarios que CVaR pretende controlar ($\rho, \varepsilon \in [0,1]$). Las Figuras 5.4 a 5.11 muestra diagramas de cajas y bigotes que representan la distribución cuartil de las ganancias obtenidas al aplicar los modelos de aversión al riesgo CVaR con cuatro valores de ε y el modelo MOTAD para las Instancias 2 y 6. Más precisamente, el modelo CVaR se prueba con $\varepsilon = 0.111$ (CVAR_0.111), $\varepsilon = 0.222$ (CVAR_0.222), $\varepsilon = 0.333$ (CVAR_0.333) y $\varepsilon = 0.444$ (CVAR_0.444). El efecto esperado de integrar medidas de riesgo es menos notorio en instancias, predios o niveles de demanda más pequeños. Sin embargo, en casos de estudios más amplios, los diagramas de caja resaltan claramente el impacto, particularmente cuando

$\varepsilon = 0.1$, como se muestra en las Figuras 5.8, 5.9, 5.10 y 5.11.

Figura 5.4: Distribución de beneficios, $\rho = 1.0$, 100 muestras de NDVI

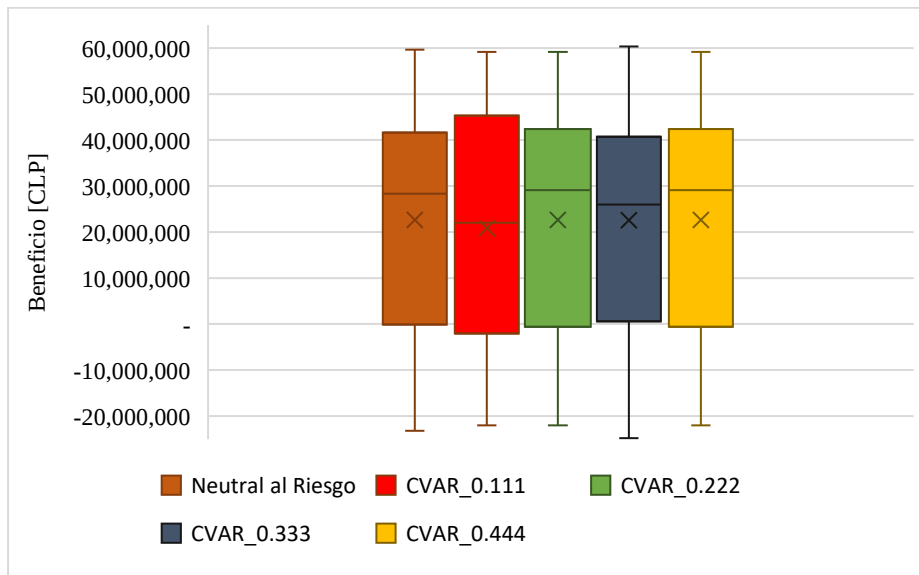


Figura 5.5: Distribución de beneficios, $\rho = 0.9$, 100 muestras de NDVI

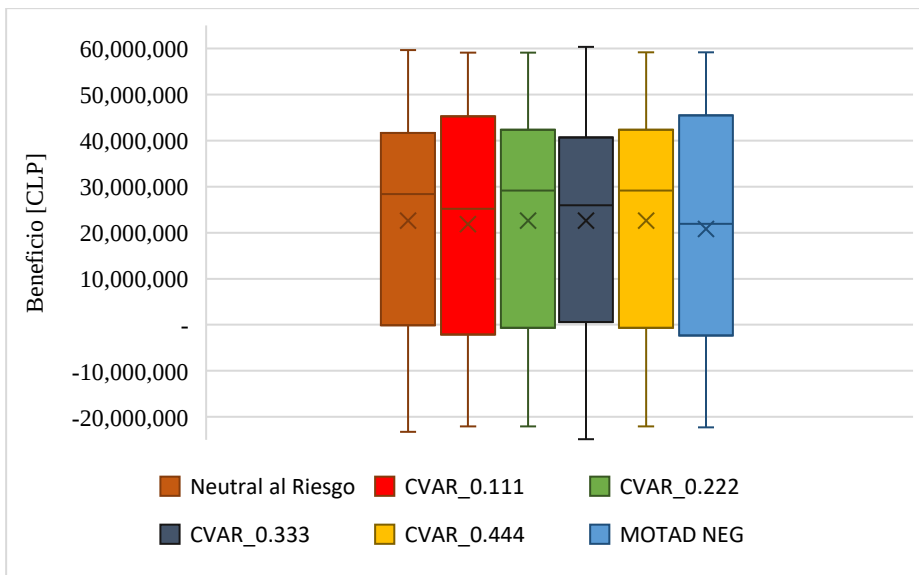


Figura 5.6: Distribución de beneficios, $\rho = 0.75$, 100 muestras de NDVI

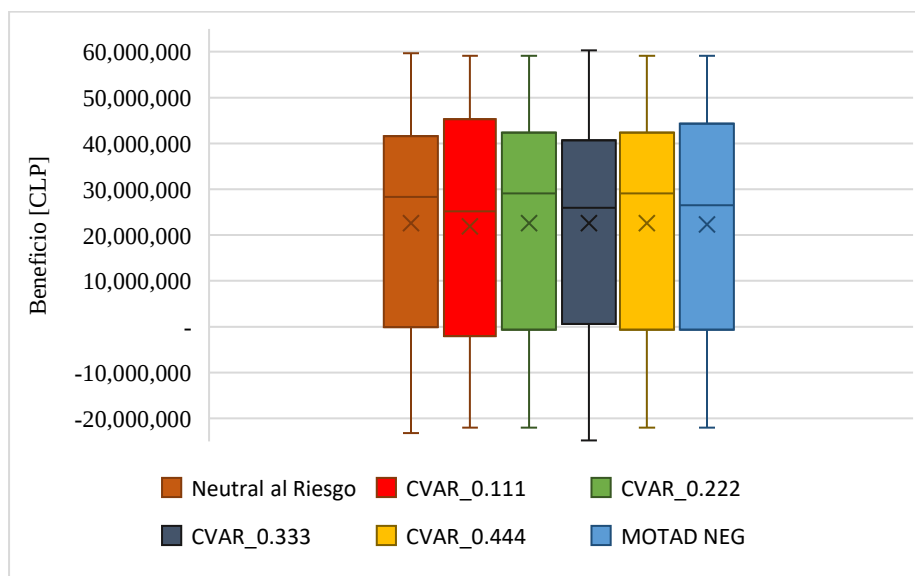


Figura 5.7: Distribución de beneficios, $\rho = 0.5$, 100 muestras de NDVI

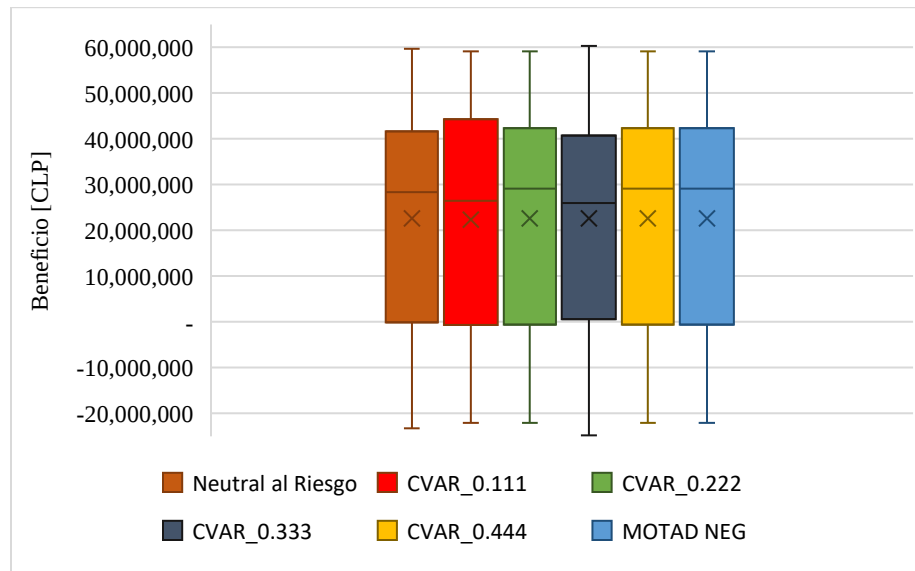


Figura 5.8: Distribución de beneficios, $\rho = 1.0$, 180 muestras de NDVI

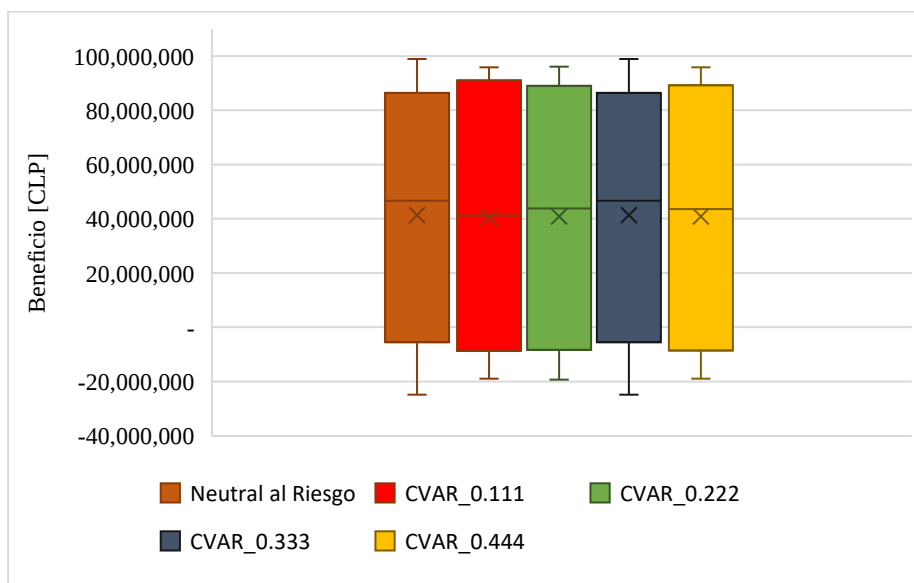


Figura 5.9: Distribución de beneficios, $\rho = 0.9$, 180 muestras de NDVI

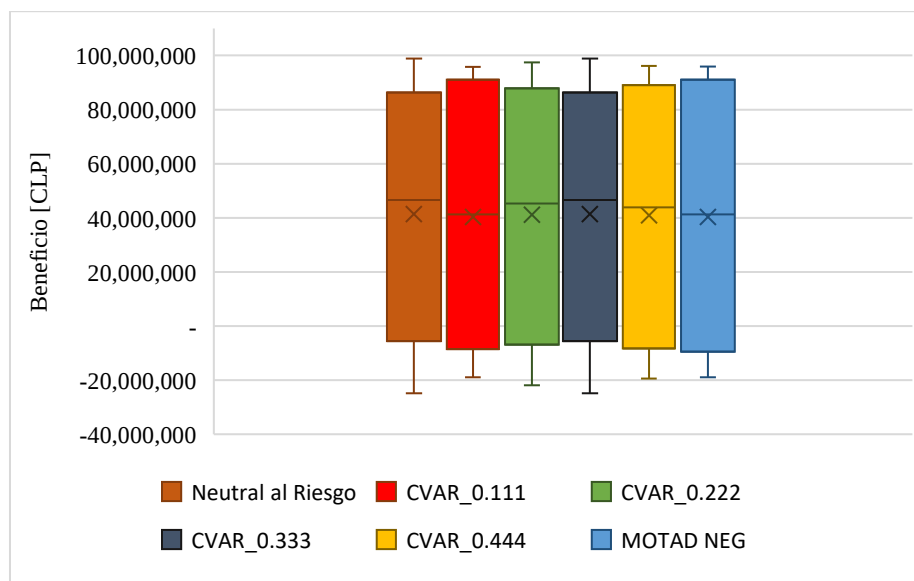


Figura 5.10: Distribución de beneficios, $\rho = 0.75$, 180 muestras de NDVI

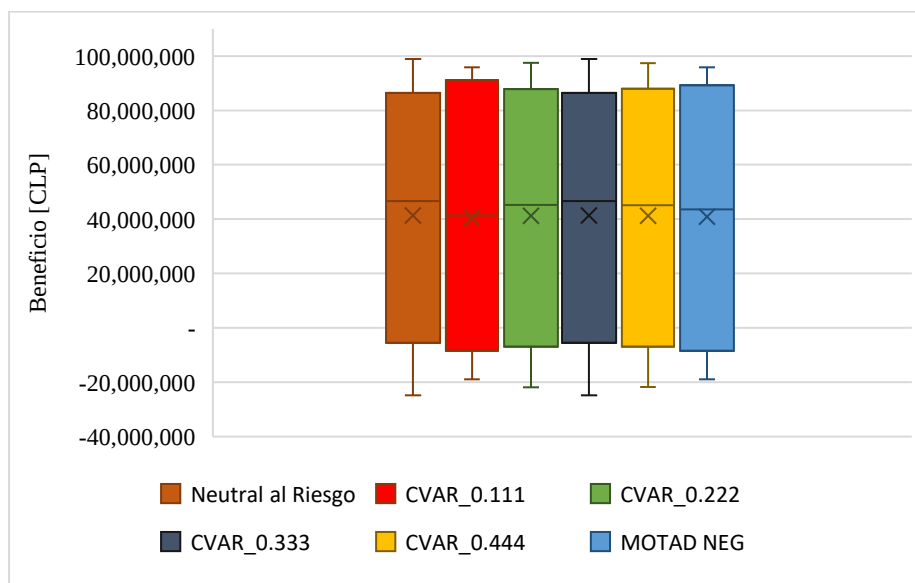
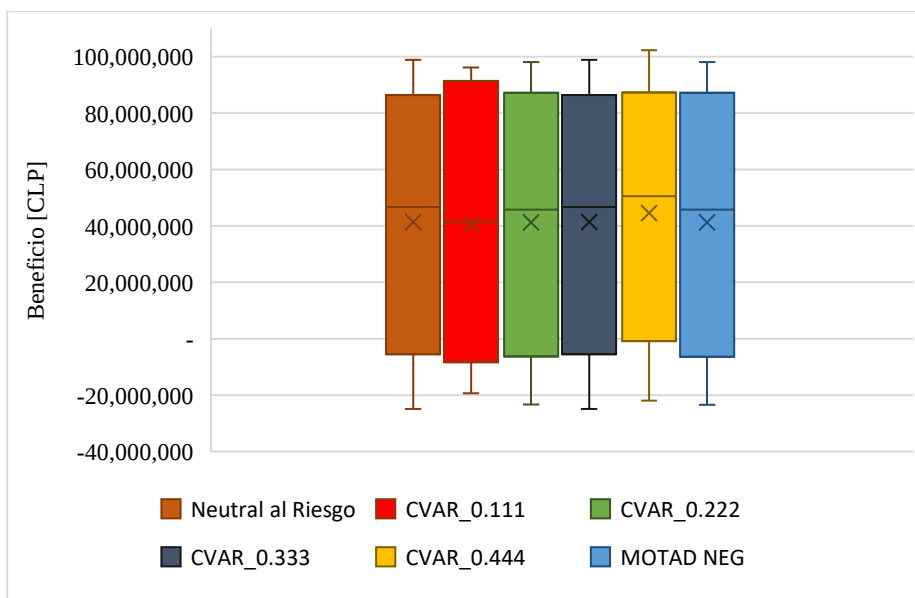


Figura 5.11: Distribución de beneficios, $\rho = 0.5$, 180 muestras de NDVI



Una vez obtenidas las soluciones óptimas tras incorporar medidas de riesgo, es

posible comparar los beneficios en cada escenario entre el modelo neutral al riesgo y los modelos aversos al riesgo. Las Tablas 5.4 y 5.5 presentan las diferencias para una instancia pequeña y una grande, respectivamente, usando $\rho = 0.9$. Las dos primeras columnas presentan el escenario y la probabilidad acumulada hasta ese punto, mientras que las columnas restantes muestran las diferencias logradas entre las cinco combinaciones resueltas. Si el GAP es positivo, eso indica que la aplicación de medidas de riesgo mejora los beneficios del escenario respectivo. Por el contrario, si el GAP es negativo, significa que las medidas de riesgo impactan negativamente en los beneficios del escenario. Los hallazgos indican que el uso de CVaR con $\varepsilon = 0.111$ produce resultados similares a la aplicación de MOTAD como medida de riesgo. Esto se debe a que ambos métodos buscan modificar las colas extremas de la distribución de beneficios. Hay que recordar que MOTAD busca minimizar la desviación media respecto al promedio de la distribución. Los resultados indican un impacto significativo en la rentabilidad por escenario para diferentes valores de ε . La mayor brecha positiva, en comparación con el modelo neutral al riesgo, se presenta en los tres peores escenarios al utilizar CVaR con $\varepsilon = 0.111$. Como era de esperar, el método mejora un mayor número de escenarios para valores mayores de ε , pero la rentabilidad baja en escenarios menos disruptivos.

Tabla 5.4: Comparación de beneficios entre el modelo neutral y averso al riesgo por escenario para Instancia 2

Escenario	Probabilidad acumulada	CVAR-0.111	CVAR-0.222	CVAR-0.333	CVAR-0.444	MOTAD
1	0.037	1,162,144	1,186,274	-1,609,856	1,187,188	977,679
2	0.074	422,649	395,559	-504,626	398,155	327,436
3	0.111	2,556,635	395,559	-504,626	398,155	2,691,229
4	0.148	-817,905	-70,469	83,408	-66,192	-1,837,135
5	0.185	-3,880,287	-536,317	670,167	-530,358	-5,224,185
6	0.222	-2,058,138	-536,317	540,956	-530,358	-7,721,174

7	0.259	-544,521	-536,317	671,214	-530,358	-530,438
8	0.296	-1,990,634	-536,317	671,214	-530,358	-2,206,358
9	0.333	-1,232,393	-536,317	671,214	-530,358	-1,218,311
10	0.37	1,463,785	1,490,484	-2,012,692	1,490,507	1,244,327
11	0.407	593,552	560,080	-712,219	562,082	479,085
12	0.444	3,104,307	560,080	-712,219	562,082	3,260,177
13	0.481	-865,929	11,775	-20,368	15,756	-2,067,832
14	0.518	1,765,247	1,794,516	-2,415,269	1,793,649	1,510,816
15	0.555	-4,469,230	-536,317	669,982	-530,358	-6,053,081
16	0.592	-2,325,032	-536,317	517,964	-530,358	-8,991,929
17	0.63	-544,521	-536,317	671,214	-530,358	-530,438
18	0.667	-2,246,112	-536,317	671,214	-530,358	-2,502,366
19	0.704	-1,353,685	-536,317	671,214	-530,358	-1,339,602
20	0.741	764,455	724,601	-919,811	726,009	630,734
21	0.778	3,651,381	724,601	-919,811	726,009	3,828,528
22	0.815	-913,953	94,020	-124,144	97,704	-2,298,006
23	0.852	-5,057,249	-536,317	669,797	-530,358	-6,880,510
24	0.889	-2,591,926	-536,317	494,971	-530,358	-10,259,567
25	0.926	-544,521	-536,317	671,214	-530,358	-530,438
26	0.963	-2,500,991	-536,317	671,214	-530,358	-2,797,776
27	1	-1,474,977	-536,317	671,214	-530,358	-1,460,894

Nota. Instancia se utiliza en un predio con 100 muestras de NDVI y $\rho = 0.90$. Tabla

Tabla 5.5: Comparación de beneficios entre el modelo neutral y averso al riesgo por escenario para Instancia 6

Escenario	Probabilidad acumulada	CVAR-0.111	CVAR-0.222	CVAR-0.333	CVAR-0.444	MOTAD
1	0.037	5,943,264	3,062,601	416	5,540,897	5,950,111
2	0.074	1,291,095	696,477	416	1,236,544	1,310,297
3	0.111	3,358,230	696,477	416	1,236,544	3,377,431
4	0.148	-1,470,035	-569,759	416	-1,284,198	-1,518,609
5	0.185	-6,492,601	-1,399,462	416	-2,788,286	-6,463,914
6	0.222	-3,018,633	-1,370,973	416	-2,759,797	-3,917,824
7	0.259	-3,047,122	-1,399,462	416	-2,788,286	-3,018,435
8	0.296	-5,114,257	-1,399,462	416	-2,788,286	-5,085,570
9	0.333	-3,047,122	-1,399,462	416	-2,788,286	-3,018,435
10	0.37	7,530,984	3,850,618	416	7,011,864	7,533,975
11	0.407	2,056,983	1,066,487	416	1,947,123	2,074,510
12	0.444	4,489,308	1,066,487	416	1,947,123	4,506,836
13	0.481	-1,191,577	-423,277	416	-1,018,627	-1,253,779
14	0.518	-7,101,298	-1,399,462	416	-2,788,286	-7,072,611

15	0.555	-3,013,604	-1,365,945	416	-2,754,768	-4,076,529
16	0.593	-3,047,122	-1,399,462	416	-2,788,286	-3,018,435
17	0.63	-5,479,448	-1,399,462	416	-2,788,286	-5,450,761
18	0.667	-3,047,122	-1,399,462	416	-2,788,286	-3,018,435
19	0.704	9,117,612	4,638,073	416	8,481,798	9,116,749
20	0.741	2,822,815	1,436,520	416	2,657,629	2,838,668
21	0.778	5,619,476	1,436,520	416	2,657,629	5,635,330
22	0.815	-913,213	-276,794	416	-753,151	-989,045
23	0.852	-7,708,569	-1,399,462	416	-2,788,286	-7,679,882
24	0.889	-3,008,575	-1,360,916	416	-2,749,739	-4,235,234
25	0.926	-3,047,122	-1,399,462	416	-2,788,286	-3,018,435
26	0.963	-5,843,783	-1,399,462	416	-2,788,286	-5,815,097
27	1	-3,047,122	-1,399,462	416	-2,788,286	-3,018,435

Nota. Instancia se utiliza en un predio con 180 muestras de NDVI y $\rho = 0.90$.

Dado que uno de los supuestos de la metodología es que los precios de mercado dependen de la vida útil restante de la fruta exportada, la clave para comprender las variaciones en los beneficios en todos los escenarios ante diferentes medidas de riesgo es analizar el porcentaje de demanda satisfecha con suficiente vida útil. Las Tablas 5.6, 5.7, 5.8 y 5.9 presentan el indicador para una instancia grande en las últimas nueve columnas (una para cada destino), mientras que las dos primeras columnas muestran el escenario y su probabilidad acumulada, con $\rho = 0.9$. En este sentido, los resultados se alinean con los análisis previos. El CVaR para $\varepsilon = 0.111$ y los casos MOTAD muestran una distribución de cumplimiento similar en todos los clientes y escenarios. Además, para reducir el riesgo en un porcentaje específico de escenarios, CVaR mejora el cumplimiento de la vida útil en los peores casos, mientras que MOTAD busca estabilizar el valor del indicador en todos los escenarios. En ciertos escenarios, el modelo neutral al riesgo suele tener dificultades para cumplir con los requisitos de vida útil de cuatro clientes clave: Europa, Estados Unidos, China y Corea del Sur. Sin embargo, los modelos aversos al riesgo buscan mejorar el cumplimiento alcanzado por estos clientes en condiciones difíciles.

Tabla 5.6: Cumplimiento de vida útil para modelo neutral al riesgo

Cumplimiento de vida útil requerida [%]										
Escenario	Probabilidad acumulada	BR	CA	CH	CO	SK	EC	EU	JA	US
1	0.037	100	100	87	0	0	100	13	0	76
2	0.074	100	100	100	100	0	100	100	0	76
3	0.111	100	100	100	100	0	100	100	0	76
4	0.148	100	100	100	100	0	100	100	100	76
5	0.185	100	100	100	0	100	100	100	100	100
6	0.222	100	100	100	100	100	89	100	100	100
7	0.259	100	100	100	100	100	100	100	100	100
8	0.296	100	100	100	100	100	100	100	100	100
9	0.333	100	100	100	100	100	100	100	100	100
10	0.370	100	100	87	0	0	100	13	0	76
11	0.407	100	100	100	100	0	100	100	0	76
12	0.444	100	100	100	100	0	100	100	0	76
13	0.481	100	100	100	100	0	100	100	100	76
14	0.518	100	100	100	0	100	100	100	100	100
15	0.555	100	100	100	100	100	89	100	100	100
16	0.593	100	100	100	100	100	100	100	100	100
17	0.630	100	100	100	100	100	100	100	100	100
18	0.667	100	100	100	100	100	100	100	100	100
19	0.704	100	100	87	0	0	100	13	0	76
20	0.741	100	100	100	100	0	100	100	0	76
21	0.778	100	100	100	100	0	100	100	0	76
22	0.815	100	100	100	100	0	100	100	100	76
23	0.852	100	100	100	0	100	100	100	100	100
24	0.889	100	100	100	100	100	89	100	100	100
25	0.926	100	100	100	100	100	100	100	100	100
26	0.963	100	100	100	100	100	100	100	100	100
27	1.000	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Tabla 5.7: Cumplimiento de vida útil para modelo con CVaR integrado, $\varepsilon = 0.1$

Cumplimiento de vida útil requerida [%]											
Escenario	Probabilidad acumulada	BR	CA	CH	CO	SK	EC	EU	JA	US	
1	0.037	100	100	100	0	0	100	36	0	90	
2	0.074	100	100	100	100	0	100	100	0	90	
3	0.111	100	100	100	100	100	100	100	0	90	
4	0.148	100	100	100	100	0	100	100	100	90	
5	0.185	100	100	100	0	0	100	100	100	100	

6	0.222	100	100	100	100	100	100	100	100	100
7	0.259	100	100	100	100	100	100	100	100	100
8	0.296	100	100	100	100	0	100	100	100	100
9	0.333	100	100	100	100	100	100	100	100	100
10	0.370	100	100	100	0	0	100	36	0	90
11	0.407	100	100	100	100	0	100	100	0	90
12	0.444	100	100	100	100	100	100	100	0	90
13	0.481	100	100	100	100	0	100	100	100	90
14	0.518	100	100	100	0	0	100	100	100	100
15	0.555	100	100	100	100	100	100	100	100	100
16	0.593	100	100	100	100	100	100	100	100	100
17	0.630	100	100	100	100	0	100	100	100	100
18	0.667	100	100	100	100	100	100	100	100	100
19	0.704	100	100	100	0	0	100	36	0	90
20	0.741	100	100	100	100	0	100	100	0	90
21	0.778	100	100	100	100	100	100	100	0	90
22	0.815	100	100	100	100	0	100	100	100	90
23	0.852	100	100	100	0	0	100	100	100	100
24	0.889	100	100	100	100	100	100	100	100	100
25	0.926	100	100	100	100	100	100	100	100	100
26	0.963	100	100	100	100	0	100	100	100	100
27	1.000	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Tabla 5.8: Cumplimiento de vida útil para modelo con CVaR integrado, $\varepsilon = 0.444$

Escenario	Probabilidad acumulada	Cumplimiento de vida útil requerida [%]								
		BR	CA	CH	CO	SK	EC	EU	JA	US
1	0.037	100	100	100	0	0	100	34	0	89
2	0.074	100	100	100	100	0	100	100	0	89
3	0.111	100	100	100	100	0	100	100	0	89
4	0.148	100	100	100	100	0	100	100	100	89
5	0.185	100	100	100	0	100	100	100	100	100
6	0.222	100	100	100	100	100	100	100	100	100
7	0.259	100	100	100	100	100	100	100	100	100
8	0.296	100	100	100	100	100	100	100	100	100
9	0.333	100	100	100	100	100	100	100	100	100
10	0.370	100	100	100	0	0	100	34	0	89
11	0.407	100	100	100	100	0	100	100	0	89
12	0.444	100	100	100	100	0	100	100	0	89
13	0.481	100	100	100	100	0	100	100	100	89
14	0.518	100	100	100	0	100	100	100	100	100
15	0.555	100	100	100	100	100	100	100	100	100

16	0.593	100	100	100	100	100	100	100	100	100
17	0.630	100	100	100	100	100	100	100	100	100
18	0.667	100	100	100	100	100	100	100	100	100
19	0.704	100	100	100	0	0	100	34	0	89
20	0.741	100	100	100	100	0	100	100	0	89
21	0.778	100	100	100	100	0	100	100	0	89
22	0.815	100	100	100	100	0	100	100	100	89
23	0.852	100	100	100	0	100	100	100	100	100
24	0.889	100	100	100	100	100	100	100	100	100
25	0.926	100	100	100	100	100	100	100	100	100
26	0.963	100	100	100	100	100	100	100	100	100
27	1.000	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Tabla 5.9: Cumplimiento de vida útil para modelo con MOTAD integrado

Escenario	Probabilidad acumulada	Cumplimiento de vida útil requerida [%]								
		BR	CA	CH	CO	SK	EC	EU	JA	US
1	0.037	100	100	100	0	0	100	35	0	90
2	0.074	100	100	100	100	0	100	100	0	90
3	0.111	100	100	100	100	100	100	100	0	90
4	0.148	100	100	100	0	0	100	100	100	90
5	0.185	100	100	100	0	0	100	100	100	100
6	0.222	100	100	100	0	100	7	100	100	100
7	0.259	100	100	100	100	100	100	100	100	100
8	0.296	100	100	100	100	0	100	100	100	100
9	0.333	100	100	100	100	100	100	100	100	100
10	0.370	100	100	100	0	0	100	35	0	90
11	0.407	100	100	100	100	0	100	100	0	90
12	0.444	100	100	100	100	100	100	100	0	90
13	0.481	100	100	100	0	0	100	100	100	90
14	0.518	100	100	100	0	0	100	100	100	100
15	0.555	100	100	100	0	100	7	100	100	100
16	0.593	100	100	100	100	100	100	100	100	100
17	0.630	100	100	100	100	0	100	100	100	100
18	0.667	100	100	100	100	100	100	100	100	100
19	0.704	100	100	100	0	0	100	35	0	90
20	0.741	100	100	100	100	0	100	100	0	90
21	0.778	100	100	100	100	100	100	100	0	90
22	0.815	100	100	100	0	0	100	100	100	90
23	0.852	100	100	100	0	0	100	100	100	100
24	0.889	100	100	100	0	100	7	100	100	100
25	0.926	100	100	100	100	100	100	100	100	100

26	0.963	100	100	100	100	0	100	100	100	100
27	1.000	100	100	100	100	100	100	100	100	100

La Tabla 5.10 presenta una comparación de las decisiones de cosecha y procesamiento de uva fresca entre dos enfoques para la Instancia 6: los modelos neutrales al riesgo y aversos al riesgo ($\rho = 0.9, \varepsilon = 0.111$). Para los resultados de cada modelo, la primera columna muestra el período de cosecha, la segunda columna indica la cantidad de uvas sin procesar usada para satisfacer demanda, la tercera columna corresponde al período de recubrimiento y la cuarta columna muestra la cantidad de uvas procesadas para extender la vida útil. Los resultados revelan que el modelo averso al riesgo mejora los beneficios en escenarios disruptivos al trasladar una mayor porción de la cosecha a períodos posteriores y reducir la cantidad de uvas sin procesar utilizadas para abastecer clientes críticos. Los modelos aversos al riesgo también proponen modificaciones en la utilización de puertos como estrategia para mitigar las disrupciones, como se ilustra en la Tabla 5.2 para diferentes casos. Todos los clientes complicados (Europa, Estados Unidos, China) se abastecen a través del puerto de San Vicente en el modelo neutral al riesgo. Sin embargo, los modelos de aversión al riesgo reasignan a China y Corea del Sur a otros puertos para diversificar las decisiones de transporte.

Tabla 5.10: Plan de cosecha propuesto para clientes críticos

Modelo Neutral al Riesgo				CVAR, $\rho = 0.9, \varepsilon = 0.111$			
Periodo cosecha	SU [Kg]	Periodo Proceso	SP [Kg]	Periodo cosecha	SU [Kg]	Periodo Proceso	SP [Kg]
Europa				Europa			
11	-	11	1,596	12	-	12	131
12	-	12	7,347	13	-	13	7,497
13	-	13	7,497	14	-	14	7,650
14	-	14	7,650	14	-	21	315
15	-	15	7,806	15	-	15	7,806

15 -	20	412	15 -	21	344
16 -	16	4,659	16 -	16	7,965
			16 -	20	374
			20 -	20	4,886
Estados Unidos			Estados Unidos		
3 -	3	6,110	3 -	3	6,126
4 -	4	6,251	4 -	4	6,251
5 -	5	5,858	5 -	5	6,064
6 -	6	6,508	6 -	6	3,169
7 -	7	5,544	7 -	7	6,641
8 -	8	6,777	8 -	8	6,777
9 -	9	6,915	9 -	9	5,786
10 -	10	4,626	10 -	10	7,056
11 -	11	3,987	11 -	11	7,200
20 4,430 -	-		12 -	12	7,216
21 12,080 -	-		21 6,801 -	-	
China			China		
16 -	16	3,306	17 -	17	8,128
16 -	20	501	17 -	20	393
17 -	17	8,128	18 -	18	8,294
17 -	20	528	18 -	20	414
18 -	18	8,294	19 -	19	8,463
18 -	19	670	19 -	20	2,490
19 -	19	7,793	20 -	20	80
19 -	20	1,016	20 -	21	1,975
Corea del Sur			Corea del Sur		
20 -	20	4,375	21 -	21	4,375

Nota. Se presenta la comparación del modelo neutral al riesgo y una configuración del modelo que integra el CVaR.

Hasta este punto, la inclusión de medidas de riesgo ha demostrado su capacidad para traducir los parámetros de entrada que enfatizan la mayor importancia de los escenarios de riesgo en decisiones operativas más conservadoras. Sin embargo, el uso de estos modelos presenta aspectos negativos. Las Tablas 5.11 y 5.12 presentan el tiempo de resolución para los modelos reacios al riesgo bajo diferentes valores de ρ y ε (mostrados en las primeras columnas). Las últimas cuatro columnas indican el tiempo de resolución para cada

configuración y la variación relativa al modelo neutral al riesgo (positiva en todos los casos).

Tabla 5.11: Tiempos de resolución caso modelo CVaR integrado

Aversión (ρ)	ε	100 NDVI	variación	180 NDVI	variación
1	0.111	664.7	50%	10,682.5	278%
1	0.222	637.1	44%	8,690.8	208%
1	0.333	853.9	93%	9,695.9	243%
1	0.444	1,159.8	162%	9,977.0	253%
0.9	0.111	699.3	58%	14,455.8	412%
0.9	0.222	660.7	50%	9,279.3	229%
0.9	0.333	1,030.4	133%	7,030.2	149%
0.9	0.444	1,578.9	257%	9,005.1	219%
0.75	0.111	762.1	72%	13,444.8	376%
0.75	0.222	1,124.0	154%	11,959.4	324%
0.75	0.333	721.6	63%	11,521.4	308%
0.75	0.444	696.8	58%	8,532.8	202%
0.5	0.111	886.5	101%	4,538.0	61%
0.5	0.222	760.3	72%	7,538.2	167%
0.5	0.333	806.2	82%	6,101.6	116%
0.5	0.444	870.5	97%	12,726.3	351%

Nota. Se consideran distintos valores de ρ y ε en una instancia pequeña y otra grande.

Los resultados destacan una mayor carga computacional debido a la integración de CVaR y MOTAD, lo cual se explica por el aumento en la cantidad de restricciones y variables.

Tabla 5.12: Tiempos de resolución caso modelo MOTAD integrado

Aversión (ρ)	100 NDVI	variación	180 NDVI	variación
0.9	1,578.9	257%	14,757.6	423%
0.75	1,147.9	160%	10,227.0	262%
0.5	847.6	92%	8,001.0	183%

Nota. Se consideran distintos valores de ρ en una instancia pequeña y otra grande.

CONCLUSIONES

Las cadenas de suministro agrícolas desempeñan un papel crucial para garantizar la distribución mundial de alimentos. Desarrollar mejores herramientas para optimizar la gestión de estos sistemas es esencial ya que enfrentan numerosos desafíos. Las etapas generales de la cadena de suministro de fruta fresca consisten en el cultivo/producción, la cosecha, el transporte, el almacenamiento, el procesamiento y la distribución. Considerando esas etapas, el objetivo de esta investigación es abordar los desafíos de integrar la delimitación de las zonas de gestión, la cosecha, el procesamiento y la distribución, incorporando a la vez la incertidumbre en los precios de venta y las interrupciones portuarias.

Además, la metodología propuesta considera la pérdida de vida útil remanente de la uva fresca a lo largo de la cadena de suministro y el potencial de prolongar la vida útil mediante procesos de recubrimiento. El modelo propuesto es un modelo de programación estocástica con recurso de dos etapas, donde las variables de la primera etapa corresponden a las operaciones previas a la distribución, mientras que las variables de la segunda etapa representan las operaciones posteriores a la materialización de un escenario de disrupción que pudiera expender los tiempos de exportación.

El modelo busca maximizar los beneficios esperados y, se proponen dos extensiones del modelo neutral al riesgo integrando medidas de riesgo: primero considerando el CVaR, que busca aumentar las ganancias en los peores escenarios, y posteriormente el MOTAD, que busca reducir la desviación media de la distribución promedio de ganancias, para este caso solo considerando las desviaciones negativas. Dado que los precios de mercado de la uva fresca dependen de la vida útil restante, ambos modelos con aversión al riesgo ajustan

las decisiones operativas para garantizar un mejor cumplimiento de la calidad de la carga en escenarios de riesgo. Un hallazgo notable es que ambos modelos arrojan resultados similares cuando se configura el CVaR para representar un pequeño porcentaje de casos catastróficos. Por otro lado, el Valor de la Solución Estocástica (VSS) sugiere que la incorporación de la incertidumbre en la metodología conduce a mejores soluciones.

Se proponen tres posibles líneas de investigación futura. Estudiar algoritmos más eficientes para resolver los modelos de aversión al riesgo propuestos ante instancias de mayor tamaño, aprovechando su estructura misma. Por otra parte, dado que la mayoría de los modelos clásicos de riesgo son esencialmente modelos de optimización multiobjetivo, podrían proponerse nuevas variaciones de la función objetivo para integrar otras medidas de riesgo, ya que en este trabajo la función objetivo se linealizó y ponderó utilizando un parámetro de aversión al riesgo. Finalmente, existen más alternativas para prolongar la vida útil o retrasar la pérdida de calidad que pueden integrarse en el modelo, más allá del proceso de recubrimiento, como el transporte refrigerado de la fruta, el almacenamiento en frío o el almacenamiento en atmósfera controlada. Estas alternativas pueden contribuir a la toma de decisiones más acertadas ante la interrupción del suministro de fruta fresca.

REFERENCIAS

- Adesina, A. A., & Ouattara, A. D. (2000). Risk and agricultural systems in northern Côte d'Ivoire. *Agricultural Systems*, 66(1), 17-32. [https://doi.org/10.1016/S0308-521X\(00\)00033-0](https://doi.org/10.1016/S0308-521X(00)00033-0)
- Ahumada, O., & Villalobos, J. R. (2009). Application of planning models in the agri-food supply chain: A review. *European journal of Operational research*, 196(1), 1-20. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2008.02.014>
- Ahumada, O., & Villalobos, J. R. (2011b). A tactical model for planning the production and distribution of fresh produce. *Annals of Operations Research*, 190, 339-358. <https://doi.org/10.1007/s10479-009-0614-4>
- Ahumada, O., & Villalobos, J. R. (2011a). Operational model for planning the harvest and distribution of perishable agricultural products. *International Journal of Production Economics*, 133(2), 677-687. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2011.05.015>
- Ahumada, O., Villalobos, J. R., & Mason, A. N. (2012). Tactical planning of the production and distribution of fresh agricultural products under uncertainty. *Agricultural Systems*, 112, 17-26. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2012.06.002>
- Akdemir, S. (2008). Designing of cold stores and choosing of cooling system elements. *J. Appl. Sci*, 8(5), 788-794.
- Albornoz, V. M., Araneda, L. C., & Ortega, R. (2022). Planning and scheduling of selective harvest with management zones delineation. *Annals of Operations Research*, 316(2), 873-890. <https://doi.org/10.1007/s10479-021-04112-1>
- Albornoz, V. M., Véliz, M. I., Ortega, R., & Ortiz-Araya, V. (2019). Integrated versus

- hierarchical approach for zone delineation and crop planning under uncertainty. *Annals of Operations Research*, 286, 617-634. <https://doi.org/10.1007/s10479-019-03198-y>
- Ali, I., Golgeci, I., & Arslan, A. (2021). Achieving resilience through knowledge management practices and risk management culture in agri-food supply chains. *Supply Chain Management: An International Journal*, 28(2), 284-299. <https://doi.org/10.1108/SCM-02-2021-0059>
- Alonso-Ayuso, A., Escudero, L. F., Guignard, M., & Weintraub, A. (2018). Risk management for forestry planning under uncertainty in demand and prices. *European Journal of Operational Research*, 267(3), 1051-1074. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.12.022>
- Amorim, P., Meyr, H., Almeder, C., & Almada-Lobo, B. (2013). Managing perishability in production-distribution planning: a discussion and review. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 25, 389-413. <https://doi.org/10.1007/s10696-011-9122-3>
- Aouadni, S., Aouadni, I., & Rebaï, A. (2019). A systematic review on supplier selection and order allocation problems. *Journal of Industrial Engineering International*, 15, 267-289. <https://doi.org/10.1007/s40092-019-00334-y>
- Apaiiah, R. K., & Hendrix, E. M. (2005). Design of a supply chain network for pea-based novel protein foods. *Journal of Food Engineering*, 70(3), 383-391. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2004.02.043>
- Arab, S. T., Noguchi, R., Matsushita, S., & Ahamed, T. (2021). Prediction of grape yields from time-series vegetation indices using satellite remote sensing and a machine-learning approach. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 22,

100485. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100485>

Aramyan, L., Ondersteijn, C. J., Van Kooten, O., & Lansink, A. O. (2006). Performance indicators in agri-food production chains. *Frontis*, 47-64.

Ashurst, P., Hargitt, R., & Palmer, F. (2017). *Soft drink and fruit juice problems solved*. Woodhead Publishing.

Asian, S., & Nie, X. (2014). Coordination in supply chains with uncertain demand and disruption risks: Existence, analysis, and insights. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 44(9), 1139-1154.
<https://doi.org/10.1109/TSMC.2014.2313121>

Aung, M. M., & Chang, Y. S. (2014). Temperature management for the quality assurance of a perishable food supply chain. *Food Control*, 40, 198-207.
<https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2013.11.016>

Banco Mundial. (2023). Total de población.
<https://datos.bancomundial.org/indicador/SP.POP.TOTL>

Behzadi, G., O'Sullivan, M. J., Olsen, T. L., Scrimgeour, F., & Zhang, A. (2017). Robust and resilient strategies for managing supply disruptions in an agribusiness supply chain. *International journal of production economics*, 191, 207-220.
<https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.06.018>

Behzadi, G., O'Sullivan, M. J., & Olsen, T. L. (2020). On metrics for supply chain resilience. *European Journal of Operational Research*, 287(1), 145-158.
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.04.040>

Behzadi, G., O'Sullivan, M. J., Olsen, T. L., & Zhang, A. (2018). Agribusiness supply chain risk management: A review of quantitative decision models. *Omega*, 79, 21-

42. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2017.07.005>
- Bertsimas, D., & Tsitsiklis, J. N. (1997). *Introduction to linear optimization* (Vol. 6, pp. 479-530). Belmont, MA: Athena scientific.
- Beske, P., Land, A., & Seuring, S. (2014). Sustainable supply chain management practices and dynamic capabilities in the food industry: A critical analysis of the literature. *International journal of production economics*, 152, 131-143. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.12.026>
- Bohle, C., Maturana, S., & Vera, J. (2010). A robust optimization approach to wine grape harvesting scheduling. *European Journal of Operational Research*, 200(1), 245-252. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2008.12.003>
- Borodin, V., Bourtembourg, J., Hnaien, F., & Labadie, N. (2016). Handling uncertainty in agricultural supply chain management: A state of the art. *European Journal of Operational Research*, 254(2), 348-359. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.03.057>
- Boselie, D., Henson, S., & Weatherspoon, D. (2003). Supermarket procurement practices in developing countries: Redefining the roles of the public and private sectors. *American journal of agricultural economics*, 85(5), 1155-1161. <https://www.jstor.org/stable/1244887>
- Boussard, J. M., & Petit, M. (1967). Representation of farmers' behavior under uncertainty with a focus-loss constraint. *American Journal of Agricultural Economics*, 49(4), 869-880. <https://doi.org/10.2307/1236943>
- Chilealimentos. (s.f.). Ventajas de Chile. Consultado el 10 de diciembre del 2023. https://chilealimentos.com/ventajas_categoria/segunda-fuerza-exportadora/
- Codron, J. M. & Lizarraga, P. (2020). Contratos de exportacion de fruta chilena:

- consignacion y venta en firme. <https://hal.inrae.fr/hal-02623205>
- Córdoba, M., Bruno, C., Costa, J., NR., P., & Balzarini, M. (2016). Protocol for multivariate homogeneous zone delineation in precision agriculture. *Biosystem Engineering*, 143, 95—107. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.12.008>
- Cid-García, N. M., Albornoz, V., Rios-Solis, Y. A., & Ortega, R. (2013). Rectangular shape management zone delineation using integer linear programming. *Computers and Electronics in Agriculture*, 93, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2013.01.009>
- Cid-García, N.M., & Ibarra-Rojas, O.J. (2019). An integrated approach for the rectangular delineation of management zones and the crop planning problems. *Computers and Electronics in Agriculture*, 164, 104925. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.104925>
- Cooper, M. C., & Ellram, L. M. (1993). Characteristics of supply chain management and the implications for purchasing and logistics strategy. *The international journal of logistics management*, 4(2), 13-24. <https://doi.org/10.1108/09574099310804957>
- Cleveland, D. A., & Soleri, D. (2005). Rethinking the risk management process for genetically engineered crop varieties in small-scale, traditionally based agriculture. *Ecology and Society*, 10(1). <https://www.jstor.org/stable/26267740>
- Dantzig, G. (1955). Linear Programming Under Uncertainty. *Management Science* 1 (3), 197-206.
- Darby-Dowman, K., Barker, S., Audsley, E., & Parsons, D. (2000). A two-stage stochastic programming with recourse model for determining robust planting plans in horticulture. *Journal of the Operational Research Society*, 51, 83-89. <https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2600858>

- Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante. (2019). Estado General Capitanías de Puerto. <https://sitport.directemar.cl/>
- Epperson, J. E., & Estes, E. A. (1999). Fruit and vegetable supply-chain management, innovations, and competitiveness: cooperative regional research project S-222. *Journal of Food Distribution Research*, 30(856-2016-56977), 38-43. <https://doi.org/10.22004/ag.econ.27221>
- Evans, J. (2018). Cold chain technology brief: Cold storage and refrigerated warehouses.
- Fahimnia, B., Tang, C. S., Davarzani, H., & Sarkis, J. (2015). Quantitative models for managing supply chain risks: A review. *European journal of operational research*, 247(1), 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.04.034>
- Fagundes, M. V. C., Teles, E. O., de Melo, S. A. V., & Freires, F. G. M. (2020). Decision-making models and support systems for supply chain risk: literature mapping and future research agenda. *European Research on Management and Business Economics*, 26(2), 63-70. <https://doi.org/10.1016/j.iedeen.2020.02.001>
- Ferrer, J. C., Mac Cawley, A., Maturana, S., Toloza, S., & Vera, J. (2008). An optimization approach for scheduling wine grape harvest operations. *International Journal of Production Economics*, 112(2), 985-999. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2007.05.020>
- Filippi, C., Mansini, R., & Stevanato, E. (2017). Mixed integer linear programming models for optimal crop selection. *Computers & Operations Research*, 81, 26-39. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2016.12.004>
- Flores, H., Villalobos, J. R., Ahumada, O., Uchanski, M., Meneses, C., & Sanchez, O. (2019). Use of supply chain planning tools for efficiently placing small farmers into high-value, vegetable markets. *Computers and electronics in agriculture*, 157, 205-217.

<https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.12.050>

- Flores, H., & Villalobos, J. R. (2020). A stochastic planning framework for the discovery of complementary, agricultural systems. *European Journal of Operational Research*, 280(2), 707-729. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2019.07.053>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2021a). Promoting fruit and vegetable consumption. <https://www.fao.org/documents/card/en/c/CB7956ES>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2021b). Land use statistics and indicators. <https://www.fao.org/3/cb6033en/cb6033en.pdf>
- France, J., & Thornley, J. H. (1984). *Mathematical models in agriculture*. Butterworths.
- Freund, R. J. (1956). The introduction of risk into a programming model. *Econometrica: Journal of the econometric society*, 253-263. <https://doi.org/10.2307/1911630>
- Gao, P., Zhu, Z., & Zhang, P. (2013). Effects of chitosan–glucose complex coating on postharvest quality and shelf life of table grapes. *Carbohydrate polymers*, 95(1), 371-378. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.03.029>
- Glen, J. J. (1987). Mathematical models in farm planning: A survey. *Operations Research*, 35(5), 641-666. <https://doi.org/10.1287/opre.35.5.641>
- Gómez-Lagos, J. E., González-Araya, M. C., Soto-Silva, W. E., & Rivera-Moraga, M. M. (2020). Optimizing tactical harvest planning for multiple fruit orchards using a metaheuristic modeling approach. *European journal of operational research*, 290(1), 297-312. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.08.015>
- González-Araya, M. C., Soto-Silva, W. E., & Espejo, L. G. A. (2015). Harvest planning in apple orchards using an optimization model. *Handbook of operations research in agriculture and the agri-food industry*, 79-105. <https://doi.org/10.1007/978-1-4939->

[2483-7 4](#)

- Grado, S. C., & Strauss, C. H. (1995). Using an inventory control model to establish biomass harvesting policies. *Solar energy*, 54(1), 3-11. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(94\)00109-Q](https://doi.org/10.1016/0038-092X(94)00109-Q)
- Gigler, J. K., Hendrix, E. M., Heesen, R. A., van den Hazelkamp, V. G., & Meerdink, G. (2002). On optimisation of agri chains by dynamic programming. *European Journal of Operational Research*, 139(3), 613-625. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(01\)00191-6](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(01)00191-6)
- Gewinner, J., Harnisch, R., & Mück, O. (1996). Manual of the prevention of post-harvest grain losses. *Manual of the prevention of post-harvest grain losses*.
- Hazell, P. B. (1971). A linear alternative to quadratic and semivariance programming for farm planning under uncertainty. *American journal of agricultural economics*, 53(1), 53-62. <https://doi.org/10.2307/3180297>
- Hendricks, K. B., & Singhal, V. R. (2005). Association between supply chain glitches and operating performance. *Management science*, 51(5), 695-711. <https://doi.org/10.1287/mnsc.1040.0353>
- Higgins, A. J., Miller, C. J., Archer, A. A., Ton, T., Fletcher, C. S., & McAllister, R. R. J. (2010). Challenges of operations research practice in agricultural value chains. *Journal of the Operational Research Society*, 61(6), 964-973. <https://doi.org/10.1057/jors.2009.57>
- Higle, J. L. (2005). Stochastic programming: optimization when uncertainty matters. In *Emerging theory, methods, and applications* (pp. 30-53). Informs. <https://doi.org/10.1287/educ.1053.0016>

- Hosseini, S., Ivanov, D., & Dolgui, A. (2019). Review of quantitative methods for supply chain resilience analysis. *Transportation research part E: logistics and transportation review*, 125, 285-307. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2019.03.001>
- Hovelaque, V., Duvaléix-Tréguer, S., & Cordier, J. (2009). Effects of constrained supply and price contracts on agricultural cooperatives. *European Journal of Operational Research*, 199(3), 769-780. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2008.08.005>
- Instituto Nacional de Estadísticas. (2017). Censos de Población y Vivienda. <https://www.ine.gob.cl/estadisticas/sociales/censos-de-poblacion-y-vivienda>
- Instituto Nacional de Estadísticas. (s.f.). Siembra y Cosecha. Consultado el 20 de noviembre del 2023. <https://www.ine.gob.cl/estadisticas/economia/agricultura-agroindustria-y-pesca/cosecha>
- Ivanov, D. (2018). Supply chain resilience: Modelling, management, and control. In *Proceedings of the structural dynamics and resilience in supply chain risk management* (pp. 45–89). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-69305-7_3
- Jabarzadeh, Y., Reyhani Yamchi, H., Kumar, V., & Ghaffarinasab, N. (2020). A multi-objective mixed-integer linear model for sustainable fruit closed-loop supply chain network. *Management of Environmental Quality: An International Journal*, 31(5), 1351-1373. <https://doi.org/10.1108/MEQ-12-2019-0276>
- Jonkman, J., Barbosa-Póvoa, A. P., & Bloemhof, J. M. (2019). Integrating harvesting decisions in the design of agro-food supply chains. *European Journal of Operational Research*, 276(1), 247-258. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.12.024>
- Kazemzadeh, N., & Hu, G. (2013). Optimization models for biorefinery supply chain network design under uncertainty. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*,

- 5(5). <https://doi.org/10.1063/1.4822255>
- Kall, P. W., & Wallace, S. W. (1994). *Stochastic Programming*. John Wiley & Sons.
- Kim, W. R., Aung, M. M., Chang, Y. S., & Makatsoris, C. (2015). Freshness Gauge based cold storage management: A method for adjusting temperature and humidity levels for food quality. *Food control*, 47, 510-519. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2014.07.051>
- King, R. P., & Phumpiu, P. F. (1996). Reengineering the food supply chain: the ECR initiative in the grocery industry. *American Journal of Agricultural Economics*, 78(5), 1181-1186. <https://doi.org/10.2307/1243488>
- Kohansal, F., Asadi-Gangraj, E., & Paydar, M. M. (2023). Sustainable edible vegetable oils supply chain network design considering big data: a fuzzy stochastic approach. *Soft Computing*, 27(21), 15769-15792. <https://doi.org/10.1007/s00500-023-08815-4>
- Kurozawa, L. E., Hubinger, M. D. & Park, K. J. (2012). Glass transition phenomenon on shrinkage of papaya during convective drying. *Journal of Food Engineering*, 108 (1), 43-50. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.07.033>
- Kusumastuti, R. D., Donk, D. P. V. & Teunter, R. (2016). Crop-related harvesting and processing planning: A review. *International Journal of Production Economics*, 174, 76-92. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.01.010>
- Lee, J., & Moon, I. (2024). An integrated model of supply chain resilience considering supply and demand uncertainties. *International Transactions in Operational Research*, 32(4), 1834-1860. <https://doi.org/10.1111/itor.13459>
- Ley N° 19542. Diario Oficial de la República de Chile. Santiago de Chile, 19 de diciembre de 1997.

- Liu, H., Zhang, J., Zhou, C., & Ru, Y. (2018). Optimal purchase and inventory retrieval policies for perishable seasonal agricultural products. *Omega*, 79, 133-145. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2017.08.006>
- Liu, M., Ding, Y., Chu, F., Dolgui, A., & Zheng, F. (2023). Robust actions for improving supply chain resilience and viability. *Omega*, 123, 102972. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2023.102972>
- López-Campos, M., González-Ramírez, R. G., Bearzotti, L., & Cannella, S. (2019). Modelling and analysis of the apples export supply chain business processes: Experiences from Chile. *Best Practices in Manufacturing Processes: Experiences from Latin America*, 29-52. https://doi.org/10.1007/978-3-319-99190-0_2
- Lowe, T. J., & Preckel, P. V. (2004). Decision technologies for agribusiness problems: A brief review of selected literature and a call for research. *Manufacturing & Service Operations Management*, 6(3), 201-208. <https://doi.org/10.1287/msom.1040.0051>
- Maia, L. O. A., Lago, R. A., & Qassim, R. Y. (1997). Selection of postharvest technology routes by mixed-integer linear programming. *International Journal of Production Economics*, 49(2), 85-90. [https://doi.org/10.1016/S0925-5273\(96\)00108-9](https://doi.org/10.1016/S0925-5273(96)00108-9)
- Markowitz, H. M. (1952). Portfolio selection. *Journal of finance*, 7(1), 71-91.
- Mateo-Fornés, J., Soto-Silva, W., González-Araya, M. C., Plà-Aragonès, L. M., & Solsona-Tehas, F. (2023). Managing quality, supplier selection, and cold-storage contracts in agrifood supply chain through stochastic optimization. *International Transactions in Operational Research*, 30(4), 1901-1930. <https://doi.org/10.1111/itor.13069>
- Md Nor, S., & Ding, P. (2020). Trends and advances in edible biopolymer coating for tropical fruit: A review. *Food Research International*, 134, 109208.

<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109208>

Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones de Chile. (s. f.). Empresas Portuarias.

Consultado el 6 de noviembre del 2023. <https://www.mtt.gob.cl/empresas-portuarias>

Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones. (2011). Reglamenta la elaboración, modificación, presentación y aprobación de los planes maestros de las empresas portuarias. <http://www.leychile.cl/N?i=121210&f=2011-07-02&p=>

Montanyà, O., & Amat, O. (2023). The resilience factors of the agri-food supply chain: An integrative review of the literature in the context of the COVID-19 pandemic. *Intangible Capital*, 19(3), 379-392. <https://doi.org/10.3926/ic.1746>

Munhoz, J. R., & Morabito, R. (2014). Optimization approaches to support decision making in the production planning of a citrus company: A Brazilian case study. *Computers and Electronics in Agriculture*, 107, 45-57. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2014.05.016>

Muriana, C. (2017). A focus on the state of the art of food waste/losses issue and suggestions for future researches. *Waste Management*, 68, 557-570. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.06.047>

Nadal-Roig, E., & Plà-Aragónés, L. M. (2015). Optimal transport planning for the supply to a fruit logistic centre. *Handbook of operations research in agriculture and the agri-food industry*, 163-177. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2483-7_7

Nahmias, S. (1982). Perishable inventory theory: A review. *Operations research*, 30(4), 680-708. <https://doi.org/10.1287/opre.30.4.680>

Nakandala, D., Lau, H., & Zhang, J. (2016). Cost-optimization modelling for fresh food quality and transportation. *Industrial Management & Data Systems*, 116(3), 564-583.

<https://doi.org/10.1108/IMDS-04-2015-0151>

Namdar, J., Li, X., Sawhney, R., & Pradhan, N. (2017). Supply chain resilience for single and multiple sourcing in the presence of disruption risks. *International journal of production research*, 56(6), 2339-2360.

<https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1370149>

Neos Guide. (2025). Optimization Problem Types. <https://neos-guide.org/guide/types/>

Nestlé. (2012). The cocoa plan. <https://www.nestlecocoaplan.com>

Nguyen, T. D., Nguyen-Quang, T., Venkatadri, U., Diallo, C., & Adams, M. (2021). Mathematical programming models for fresh fruit supply chain optimization: a review of the literature and emerging trends. *AgriEngineering*, 3(3), 519-541.

<https://doi.org/10.3390/agriengineering3030034>

Norton, R. D., & Hazell, P. B. (1986). *Mathematical programming for economic analysis in agriculture*. New York, NY, USA: Macmillan.

Observatorio Logístico. (2022). Partición Modal Comercio Exterior Importación y Exportación. <https://datos.observatoriologistico.cl/dataviews/262230/particion-modal-comercio-exterior-importacion-y-exportacion/>

Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA). (2018). *Agricultura Chilena: Reflexiones y Desafíos al 2030*.

Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA). (s.f.-a). Bases de datos comercio exterior. Consultado el 11 de junio del 2024. <https://www.odepa.gob.cl/estadisticas-del-sector/bases-de-datos-comercio-exterior>

Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA). (2023a). Boletín de empleo, octubre 2024. <https://www.odepa.gob.cl/estadisticas-del-sector/empleo-agricola>

- Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA). (2023b). Boletín de fruta, noviembre 2023. <https://www.odepa.gob.cl/publicaciones/boletines/boletin-de-fruta-noviembre-2023>
- Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA). (s.f.-b). Fichas de costo: Fruta fresca. Consultado el 11 de junio del 2024. <https://www.odepa.gob.cl/fichas-de-costo/fruta-fresca>
- Ohana-Levi, N., Bahat, I., Peeters, A., Shtein, A., Netzer, Y., Cohen, Y., & Ben-Gal, A. (2019). A weighted multivariate spatial clustering model to determine irrigation management zones. *Computers and Electronics in Agriculture*, 162, 719–73. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.05.012>
- Ortega, R.A., & Santibanez, O.A. (2007). Determination of management zones in corn (zea mays l.) based on soil fertility. *Computers and Electronics in agriculture*, 58 (1), 49–59. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2006.12.011>
- Paam, P., Berretta, R., Heydar, M., & García-Flores, R. (2019). The impact of inventory management on economic and environmental sustainability in the apple industry. *Computers and Electronics in Agriculture*, 163, 104848. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.06.003>
- Pefaur, J. (2020). Evolución Fruticultura Chilena en los Últimos 20 años. Odepa, Ministerio de Agricultura.
- Peinado-Guerrero, M., Ahumada, O., Ulloa, R., Hernandez-Cruz, X., Neal, G., Jayani, A., & Villalobos, J. R. (2024). Managing Risk in Fresh Produce Planning Considering Price Variability, Yield Variability, and Regional Complementarity. V.M. Albornoz, A. Mac Cawley & L.M. Plà-Aragónés (Eds.), *Optimization Under Uncertainty in*

- Sustainable Agriculture and Agrifood Industry (pp. 105-134). *Springer, Cham*.
https://doi.org/10.1007/978-3-031-49740-7_5
- Rama, M. V., & Narasimham, P. (2003). Controlled-atmosphere storage: effects on fruit and vegetables.
- Rajesh, R. (2016). Forecasting supply chain resilience performance using grey prediction. *Electronic Commerce Research and Applications*, 20, 42-58.
<https://doi.org/10.1016/j.elerap.2016.09.006>
- Real Academia Española. (s.f). Jugo. Consultado el 12 de enero del 2024.
<https://dle.rae.es/jugo>
- Rockafellar, R. T., & Uryasev, S. (2000). Optimization of conditional value-at-risk. *Journal of risk*, 2, 21-42.
- Rong, A., Akkerman, R., & Grunow, M. (2011). An optimization approach for managing fresh food quality throughout the supply chain. *International Journal of Production Economics*, 131(1), 421-429. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2009.11.026>
- Roudier, P., Tisseyre, B., Poilvé, H., Roger, J. (2008). Management zone delineation using a modified watershed algorithm. *Precision Agriculture* 9 (5), 233–250.
<https://doi.org/10.1007/s11119-008-9067-z>
- Ruß, G., & Kruse, R. (2011). Exploratory hierarchical clustering for management zone delineation in precision agriculture. *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, 6870, 161—173. https://doi.org/10.1007/978-3-642-23184-1_13
- Salama, O., Farouk, H.A., Galal, N.M. (2020). *Crop planning problem using rectangular management zones and different irrigation systems*. (Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, Dubai, UAE,

392—399)

Salihoglu, G., Salihoglu, N. K., Ucaroglu, S., & Banar, M. (2018). Food loss and waste management in Turkey. *Bioresource technology*, 248, 88-99.

<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.083>

Salin, V. (1998). Information technology in agri-food supply chains. *The International Food and Agribusiness Management Review*, 1(3), 329-334.

[https://doi.org/10.1016/S1096-7508\(99\)80003-2](https://doi.org/10.1016/S1096-7508(99)80003-2)

Schultz, R., & Tiedemann, S. (2006). Conditional value-at-risk in stochastic programs with mixed-integer recourse. *Mathematical programming*, 105, 365-386.

<https://doi.org/10.1007/s10107-005-0658-4>

Schultz, R., & Tiedemann, S. (2003). Risk aversion via excess probabilities in stochastic programs with mixed-integer recourse. *SIAM Journal on Optimization*, 14(1), 115-

138. <https://doi.org/10.1137/S1052623402410855>

Schuster, E. W., & Allen, S. J. (1998). Raw Material Management at Welch's, Inc. *Interfaces*,

28(5), 13-24. <https://doi.org/10.1287/inte.28.5.13>

Servicio Agrícola y Ganadero (SAG). (2019). Conoce el SAG.

https://www2.sag.gob.cl/sag_al_dia/Conoce_el_SAG.pdf

Servicio Nacional de Aduanas. (2023). Anuario estadístico 2022.

Servicio Nacional de Aduanas. (s.f.). Rol, facultades y funciones. Consultado el 30 de

noviembre de 2023. <https://www.aduana.cl/rol-facultades-y-funciones/aduana/2009-04-14/104545.html>

Shukla, M., & Jharkharia, S. (2013). Agri-fresh produce supply chain management: a state-of-the-art literature review. *International Journal of Operations & Production*

- Management*, 33(2), 114-158. <https://doi.org/10.1108/01443571311295608>
- Soto-Silva, W. E., González-Araya, M. C., Oliva-Fernández, M. A. & Plà-Aragónés, L. M. (2017). Optimizing fresh food logistics for processing: Application for a large Chilean apple supply chain. *Computers and Electronics in Agriculture*, 136, 42-57. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.02.020>
- Soto-Silva, W. E., Nadal-Roig, E., González-Araya, M. C., & Pla-Aragones, L. M. (2016). Operational research models applied to the fresh fruit supply chain. *European Journal of Operational Research*, 251(2), 345-355. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.08.046>
- Stochastic programming Society. (s.f.). What is stochastic programming? Consultado el 23 de diciembre de 2023. <https://www.stoprog.org/what-stochastic-programming>
- Subsecretaría de Transportes. (2023). Política Nacional Logístico-Portuaria Consolidado: diagnóstico y propuestas base. <https://www.subtrans.gob.cl/wp-content/uploads/2023/04/Pol%C3%ADtica-Nacional-Log%C3%ADstico-Portuaria-Consolidado-diagn%C3%B3stico-y-propuestas-base-1.pdf>
- Sun, L., Gao, F., Anderson, M. C., Kustas, W. P., Alsina, M. M., Sanchez, L., Sams, B., McKee, L., Dulaney, W., White, W. A., Alfieri, J. G., Prueger, J. H., Melton, F., & Post, K. (2017). Daily mapping of 30 m LAI and NDVI for grape yield prediction in California vineyards. *Remote Sensing*, 9(4), 317. <https://doi.org/10.3390/rs9040317>
- Tang, C. S. (2006). Perspectives in supply chain risk management. *International journal of production economics*, 103(2), 451-488. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2005.12.006>
- Tong, F., & Guo, P. (2013). Simulation and optimization for crop water allocation based on crop water production functions and climate factor under uncertainty. *Applied*

- Mathematical Modelling*, 37(14-15), 7708-7716.
<https://doi.org/10.1016/j.apm.2013.03.018>
- Tsolakis, N. K., Keramydas, C. A., Toka, A. K., Aidonis, D. A., & Iakovou, E. T. (2014). Agrifood supply chain management: A comprehensive hierarchical decision-making framework and a critical taxonomy. *Biosystems engineering*, 120, 47-64.
<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2013.10.014>
- Weintraub, A., & Romero, C. (2006). Operations research models and the management of agricultural and forestry resources: a review and comparison. *Interfaces*, 36(5), 446-457. <https://doi.org/10.1287/inte.1060.0222>
- Wiedenmann, S., & Geldermann, J. (2015). Supply planning for processors of agricultural raw materials. *European Journal of Operational Research*, 242(2), 606-619.
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.10.021>
- World Health Organization. (s.f.). Healthy diet. Consultado el 30 de noviembre de 2023.
<https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/healthy-diet>
- van Donselaar, K., Van Woensel, T., Broekmeulen, R. A. C. M., & Fransoo, J. (2006). Inventory control of perishables in supermarkets. *International journal of production economics*, 104(2), 462-472.
- van der Vorst, J. G. (2000). *Effective food supply chains: generating, modelling and evaluating supply chain scenarios*. Wageningen University and Research.
- Varas, M., Basso, F., Maturana, S., Osorio, D., & Pezoa, R. (2020). A multi-objective approach for supporting wine grape harvest operations. *Computers & Industrial Engineering*, 145, 106497. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106497>
- Velasco, J., Vicencio, S., Lozano, J.A., & Cid-García, N.M. (2023). Delineation of site-

specific management zones using estimation of distribution algorithms. *International Transactions on Operational Research*, 30, 1703–1729.

<https://doi.org/10.1111/itor.12970>

Veltman, R. H., Verschoor, J. A., & Van Dugteren, J. R. (2003). Dynamic control system (DCS) for apples (*Malus domestica* Borkh. cv ‘Elstar’): optimal quality through storage based on product response. *Postharvest Biology and Technology*, 27(1), 79-86. [https://doi.org/10.1016/S0925-5214\(02\)00186-2](https://doi.org/10.1016/S0925-5214(02)00186-2)

Verdouw, C. N., Beulens, A. J. M., Trienekens, J. H., & Wolfert, J. (2010). Process modelling in demand-driven supply chains: A reference model for the fruit industry. *Computers and electronics in agriculture*, 73(2), 174-187. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2010.05.005>

Vicencio-Medina, S.J., Rios-Solis, Y.A., Cid-Garcia, N.M. (2025). A bio-inspired optimization algorithm with disjoint sets to delineate orthogonal site-specific management zones. *Precision Agriculture*, 26 (1), 14. <https://doi.org/10.1007/s11119-024-10196-z>

ANEXOS

A.1 Parámetros del Modelo

Tabla A.1: Costos de procesamiento de chitosan glucosa

Desglose	[CLP/kg]
Equipos	3
Servicios	137
Personal	97
Chitosan	0.04

Glucosa	0.2
Ácido Acético	79
Total	316

Tabla A.2: Parámetros utilizados en el caso de estudio

Parámetro	Costo
Capacidad máxima de transporte (vcmax) [kg]	3,320
Productividad trabajadores permanentes (pp) [kg/día]	80
Productividad trabajadores temporales (pt) [kg/día]	40
Salario trabajadores permanentes (sp) [CLP/Horizonte]	500,000
Salario trabajadores temporales (st) [CLP/Día]	35,000
Nivel de Homogeneidad requerida α	1
Capacidad máxima de bodega (imax)[Kg]	570,000
Costo de inventario [CLP/Día]	58
Trabajadores temporales máximos	66

Tabla A.3: Base de precios utilizadas para generar escenarios

Destino	Beneficios [CLP/kg]	15%	-15%
Brasil (BR)	1,948	2,240	1,656
Canadá (CA)	2,628	3,022	2,234
China (CH)	3,658	4,206	3,109
Colombia (CO)	1,027	1,181	873
Corea del Sur (SK)	2,844	3,270	2,417
Ecuador (EC)	1,553	1,786	1,320
Estados Unidos (US)	1,786	2,054	1,518
Europa (EU)	2,143	2,464	1,821
Japón (JA)	2,232	2,567	1,898

Tabla A.4: Base de severidad de disrupción utilizada para generar escenarios

Caso	San Antonio	Valparaíso	San Vicente
1	0	0	0
2	0.1	0.3	0.1
3	0.2	0.2	0.2
4	0.3	0.3	0
5	0.3	0.3	0.3
6	0.2	0	0

7	0	0.2	0
8	0	0	0.2
9	0	0.4	0

A.2 Linealización de Varianza Relativa

Linealización de la función de varianza relativa en donde α corresponde al nivel mínimo de varianza requerida.

$$Varianza\ Relativa = 1 - \frac{\sum_{z \in Z} (n_z - 1) \sigma_z^2 / (N - Q)}{\sigma_{total}^2} \quad (A.1)$$

$$1 - \frac{\sum_{z \in Z} (n_z - 1) \sigma_z^2 Q_z / (N - \sum_z Q_z)}{\sigma_{total}^2} \geq \alpha \quad (A.2)$$

$$\sum_{z \in Z} [(n_z - 1) \sigma_z^2 + (1 - \alpha) \sigma_{total}^2] Q_z \geq (1 - \alpha) \sigma_{total}^2 n_s \quad (A.3)$$

A.2 Escala de Vida Útil

Para traducir la vida útil requerida para cada país de exportación en el factor indicador utilizado, se asume que la uva siempre que es cosechada tiene el máximo vida útil restante (33 días), se fija asocia el valor máximo con 1 y el valor mínimo requerido para exportar (14 días) en 0. Con lo anterior se construye la ecuación (A.4)

$$Y = 0.053 X - 0.737 \quad (A.4)$$