



UNIVERSIDAD  
DE LA REPÚBLICA  
URUGUAY



FACULTAD DE  
INGENIERÍA  
UDELAR

---

# **Análisis de las pérdidas de manzanas en Uruguay:**

## **Modelado matemático multiobjetivo de la cadena de suministro**

---

Proyecto de grado presentado a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República en cumplimiento parcial de los requerimientos para la obtención del título de Ingeniero de Producción.

**Matías Carricart**

**Julieta Merlo**

**Ximena Tellería**

Tutores: Patricia Burzaco, María José Crosa y Adrián Ferrari

Montevideo, Uruguay  
16 de marzo de 2025

## Resumen

El presente informe detalla el desarrollo de un modelo matemático para simular parte de la cadena de suministro de manzanas en Uruguay, abarcando las etapas de cosecha, almacenamiento y venta. El objetivo principal es optimizar las estrategias de almacenamiento y comercialización, maximizando los márgenes operativos y minimizando las pérdidas de manzanas generadas.

La cadena de suministro de manzanas es una de las más relevantes del sector frutícola del país, especialmente en la región sur. A partir de estudios realizados sobre las pérdidas de manzana a lo largo de la cadena, se identificó que el packing es un punto crítico, con pérdidas de hasta el 18 % del volumen almacenado [6].

Como parte de la metodología, se realizaron entrevistas con productores, operadores de packing, distribuidores mayoristas y minoristas (grandes superficies). El análisis de estas reveló dos aspectos clave: la calidad y durabilidad de la fruta están fuertemente influenciadas por la capacitación de la mano de obra empleada en la cosecha, y las pérdidas a lo largo de la cadena no suelen ser debidamente medidas ni controladas.

El alcance del modelo abarca las operaciones de un establecimiento productor y packing con una cartera de clientes variada, ubicado en la zona sur de Uruguay. El modelo desarrollado representa las decisiones asociadas a la selección del nivel de capacitación de la mano de obra, las cantidades destinadas al almacenamiento, los tiempos de conservación y las estrategias de comercialización. Se incorporaron tasas de deterioro y sus efectos sobre la calidad de la fruta, bajo el principio de garantizar la rentabilidad de la producción. Por ello, se adoptó un enfoque multiobjetivo, equilibrando la maximización del margen económico y la minimización de las pérdidas de manzanas.

La implementación se realizó mediante la aproximación de la “Frontera de Pareto” utilizando el “Método de Restricciones Épsilon”. El modelo demuestra una mayor sensibilidad hacia la maximización del margen económico que hacia la minimización de las pérdidas, lo cual es lógico, ya que las pérdidas ocurren cuando la fruta no se comercializa. En todas las simulaciones realizadas, se seleccionó consistentemente la mano de obra más capacitada. Esto impulsó el desarrollo de un escenario alternativo en el que se incluyó como variable la cantidad de árboles a plantar, fijando el nivel de capacitación de la mano de obra en su grado máximo. Este enfoque permitió obtener información adicional relevante, aunque se enfoca en decisiones estratégicas más que operativas.

Los análisis de sensibilidad y resultados, tomando como referencia un punto específico de la frontera, arrojan las siguientes conclusiones clave:

1. Maximizar el margen exige una reducción de las pérdidas, pero minimizar las pérdidas no siempre se traduce en un buen margen económico.
2. El calibre pequeño representa pérdidas grandes, por lo que venderlo directamente a sidrerías al momento de la cosecha evitaría costos innecesarios de almacenamiento.
3. Priorizar clientes de alto valor económico contribuye a mejorar los márgenes, aunque también incrementa las pérdidas debido a los estrictos estándares de calidad.
4. La mano de obra altamente capacitada es fundamental para optimizar la calidad del producto, reducir las pérdidas y maximizar los beneficios, lo que justifica el costo adicional asociado.
5. Es esencial realizar un monitoreo, control y medición adecuados del sistema, especialmente en la cámara de atmósfera controlada, para lograr una gestión eficiente del almacenamiento.

**Palabras clave:** cadena de suministro, pérdidas y desperdicio de alimentos, modelado matemático, optimización multiobjetivo, frontera de Pareto, planificación de almacenamiento y comercialización, calidad.

# Índice

<b>Agradecimientos</b>	<b>5</b>
<b>Índice de figuras</b>	<b>9</b>
<b>Índice de tablas</b>	<b>11</b>
<b>1. Glosario</b>	<b>13</b>
<b>2. Introducción</b>	<b>15</b>
<b>3. Marco teórico</b>	<b>17</b>
3.1. Pérdidas y desperdicios de alimento a nivel global . . . . .	17
3.1.1. Estimación de pérdidas y desperdicios de alimento en Uruguay . . . . .	18
3.2. Cadena de suministro de Manzanas . . . . .	18
3.2.1. Mercado de manzanas en Uruguay . . . . .	18
3.2.2. Actores . . . . .	19
3.3. Pérdidas en manzana en Uruguay . . . . .	23
3.4. Modelado matemático multiobjetivo . . . . .	28
3.4.1. Frontera de Pareto . . . . .	29
3.4.2. Metodología de construcción de la frontera de Pareto . . . . .	30
<b>4. Descripción del problema</b>	<b>31</b>
4.1. Definición del alcance . . . . .	31
<b>5. Modelado matemático</b>	<b>33</b>
5.1. Descripción del modelo matemático . . . . .	33
5.1.1. Hipótesis . . . . .	33
5.1.2. Conjuntos . . . . .	34
5.1.3. Parámetros . . . . .	34
5.1.4. Variables de decisión . . . . .	35
5.1.5. Restricciones . . . . .	36
5.1.6. Función objetivo . . . . .	39
5.2. Formulación del modelo matemático . . . . .	39
<b>6. Implementación del modelo matemático</b>	<b>43</b>
6.1. Datos . . . . .	43
6.2. Estrategia de implementación . . . . .	44
<b>7. Validación del modelo matemático</b>	<b>45</b>
7.1. Caso base . . . . .	45
7.2. Escenarios de Validación del Modelo . . . . .	46
7.2.1. Capacidades de almacenamiento insuficientes . . . . .	46
7.2.2. Restricciones de lote mínimo . . . . .	47
7.2.3. Variaciones en los parámetros $\alpha$ y $\beta$ . . . . .	47
7.2.4. Costos de almacenamiento superiores a los precios de venta . . . . .	47
7.3. Modificaciones introducidas a raíz del resultado de validaciones . . . . .	47
<b>8. Análisis de resultados</b>	<b>51</b>
8.1. Ejecución del modelo matemático . . . . .	51
8.2. Construcción de la frontera de Pareto . . . . .	51
8.3. Interpretación de resultados . . . . .	53

<b>9. Análisis de sensibilidad</b>	<b>61</b>
9.1. Análisis de sensibilidad sobre los precios de venta . . . . .	61
9.2. Análisis de sensibilidad sobre las tasas de deterioro de calidad por almacenamiento	62
9.3. Análisis de sensibilidad sobre la distribución de calibres en los bins . . . . .	63
9.4. Análisis de sensibilidad sobre la calidad máxima inicial . . . . .	64
9.5. Análisis de sensibilidad sobre porcentaje de pérdidas y costo de mano de obra . .	65
9.6. Análisis de sensibilidad sobre las proporciones de las variedades de manzanas . .	67
9.6.1. Análisis de sensibilidad sobre el total de árboles plantados . . . . .	68
9.7. Análisis de sensibilidad sobre la relación calidad-precio . . . . .	69
9.8. Análisis de sensibilidad sobre la proporción de demanda de los clientes . . . . .	70
9.9. Análisis de sensibilidad sobre los costos de almacenamiento . . . . .	70
<b>10. Formulación alternativa</b>	<b>73</b>
10.1. Construcción de la frontera de Pareto . . . . .	73
10.2. Interpretación de resultados . . . . .	74
10.3. Análisis de sensibilidad . . . . .	76
10.3.1. Análisis de sensibilidad sobre la distribución de calibres en los bins . . . .	77
10.3.2. Análisis de sensibilidad sobre la relación calidad-precio . . . . .	78
<b>11. Conclusiones</b>	<b>79</b>
<b>12. Perspectivas y continuidad del estudio</b>	<b>81</b>
<b>13. Bibliografía</b>	<b>83</b>
<b>14. Anexo</b>	<b>87</b>
14.1. Anexo electrónico . . . . .	87
14.2. Entrevistas . . . . .	87
14.2.1. Vicente Giudice - Packing y productor . . . . .	87
14.2.2. Pablo Pacheco y Juliana Bruzzzone - UAM (Mayorista) . . . . .	90
14.2.3. Federico Veiga - Coordinador Supply Chain Tienda Inglesa . . . . .	93
14.3. Patricia de León - Packing y productora . . . . .	95
14.3.1. Gustavo Moizo - Productor y Packing . . . . .	98
14.3.2. Julio Yaquinta - Productor . . . . .	101
14.3.3. Vivian Severino - Ingeniera Agrónoma . . . . .	104