

**Tipo de documento:** Tesis de maestría

**Escuela de Negocios.** Master in Management + Analytics

# Un enfoque de optimización combinatoria para planificación ganadera

Autoría: Tempelsman, Joaquín Pablo

Año: 2024

## ¿Cómo citar este trabajo?

Tempelsman, J. (2024). "Un enfoque de optimización combinatoria para planificación ganadera". [Tesis de maestría. Universidad Torcuato Di Tella]. Repositorio Digital Universidad Torcuato Di Tella.

<https://repositorio.utdt.edu/handle/20.500.13098/12880>

El presente documento se encuentra alojado en el Repositorio Digital de la Universidad Torcuato Di Tella bajo una licencia Creative Commons Atribución-Compartir igual 4.0 Internacional Deed  
Dirección: <https://repositorio.utdt.edu>



Universidad Torcuato Di Tella

Tesis de Maestría en Gestión + Analítica

---

Un enfoque de optimización combinatoria para  
planificación ganadera

---

Por  
**Joaquin Pablo Tempelsman**

Tutor: **Javier Marengo**

*enero 2024*



# **Un enfoque de optimización combinatoria para planificación ganadera**

Trabajo de Fin de Máster en Gestión y Análisis de Datos

**Joaquin Pablo Tempelsman**

## **Abstracto**

Esta tesis explora la planificación de una operación ganadera real a lo largo de un esquema de múltiples períodos. Nuestro objetivo es diseñar y validar una solución prescriptiva basada en programación lineal entera mixta. La estrategia aplicada se basa en optimizar los ingresos sujetos a restricciones que representan las complejidades de una empresa ganadera.

Para validar el modelo propuesto, se realizan evaluaciones comparativas en múltiples escenarios y entornos frente a un modelo competitivo que representa las heurísticas aplicadas actualmente por los gerentes de la empresa.

El análisis concluye que la solución no sólo se adapta exitosamente a los complejos y diversos escenarios propuestos, sino que también encuentra, para los experimentos diseñados, soluciones convincentes y explicables que potencialmente pueden ser adoptadas por la gerencia para mejorar sistemáticamente la competencia.cualquier operación.

En los capítulos finales, analizamos posibles mejoras del modelo y esbozamos una hoja de ruta para la integración. La propuesta de integración de dos pasos está diseñada para abordar los principales desafíos identificados durante la fase de evaluación.

# Contenido

<b>Contenido</b> .....	<b>4</b>
<b>I. Contexto y justificación del estudio</b> .....	<b>1</b>
Objetivo de tesis.....	1
Revisión de literatura.....	2
Esquema de la tesis.....	3
<b>II. Caso de negocio</b> .....	<b>5</b>
Descripción del caso concreto a tratar.....	5
En etapa de colaboración, evaluación y descubrimiento de negocios.....	7
Necesidades y aspiraciones estratégicas del negocio.....	8
Entradas de datos y consideraciones.....	8
Propuesta de solución mediante optimización lineal mixta.....	11
Introducción.....	11
Modelo.....	12
<b>III. Análisis de referencia</b> .....	<b>19</b>
Estrategia de referencia 1: operación anterior del negocio versus solucionador.....	19
Estrategia de referencia 2: línea de base empresarial frente a solución optimizada.....	20
Análisis de resultados de referencia.....	21
Análisis de la función objetiva.....	24
Análisis de ventas.....	26
Análisis de transferencia.....	28
Análisis de instancias específicas.....	30
Análisis de instancia m2019_24periods:.....	30
Análisis de instancia 2019_120periods_fcst:.....	32
Análisis de duración de variantes.....	35
<b>IV. Conclusiones</b> .....	<b>38</b>
Dimensiones comerciales valiosas para las próximas iteraciones.....	38
Próximos pasos en la implementación empresarial.....	40
Optimización de ventas.....	40
Optimización de la reproducción.....	41
Otras Consideraciones.....	42
<b>V. Referencias bibliográficas</b> .....	<b>43</b>



# I. Contexto y justificación del estudio.

En los últimos años, el uso intensivo de tecnología ha sido la principal variable de cambio en múltiples industrias. La agricultura también ha sido un terreno fértil para la innovación, particularmente si consideramos el contexto argentino. Desde la década de 1990, el uso cada vez mayor de la tecnología ha permitido aumentar el rendimiento por hectárea, acercándolo a los niveles internacionales de eficiencia productiva año tras año.

La tecnología a menudo se manifiesta a través de software propietario en distintos segmentos operativos para resolver una tarea específica, desvinculada de la toma de decisiones estratégicas de gestión. Esta tesis tiene como objetivo construir una propuesta para una solución prescriptiva de código abierto que pueda diseñarse, poseerse e integrarse directamente en el núcleo del negocio.

Industrias como la banca y la atención médica, con una historia más larga de aprovechamiento y uso de datos para dirigir de manera verdadera y consistente su proceso de toma de decisiones, aún enfrentan importantes desafíos culturales. Cuando pasamos a industrias que no son tradicionalmente digitales, nos enfrentamos a un doble desafío tanto en la gestión de los datos como en la adopción de la solución. A pesar de esto, las recompensas de dichas integraciones aún son abundantes por alcanzar.

## Objetivo de tesis

El objetivo del proyecto es construir una solución prescriptiva para una empresa ganadera familiar con sede en la Provincia de Santa Fe, Argentina. La dirección de la empresa compartió la necesidad de utilizar un método basado en datos para guiarlos en la optimización de partes centrales de su operación que actualmente se manejan mediante el uso de una combinación de conocimiento basado en experiencias pasadas y expectativas futuras.

Cada año la empresa tiene que decidir qué parte del stock femenino se destinará a la reproducción (aumentando el stock futuro) o a la venta en el presente. Posteriormente, también deben planificar cuántas existencias se venderán en cada categoría de peso o etapa entre tres alternativas principales. Los precios y costos de cada decisión varían diariamente dependiendo de diversos factores.

La interacción con los stakeholders del negocio reveló la necesidad de construir un método cuantitativo que les permitiera decidir estratégicamente cómo planificar dos aspectos

---

fundamentales de su operación. Discerniendo el **óptimo Equilibrio entre aumentar el stock reproductivo o priorizar las ventas actuales dadas las diferentes condiciones del mercado**.. La segunda investigación fue definir el **categoría de venta óptima** entre destete, peso medio y peso alto.

Al adoptar un proceso de toma de decisiones basado en datos, el objetivo no es solo mejorar los ingresos sino también crear una herramienta flexible que les permita tomar decisiones gerenciales mejor informadas mientras lo hacen. La integración prescriptiva permite adaptarse rápidamente y aprender de escenarios potencialmente cambiantes influenciados por los precios de los mercados locales y extranjeros, las regulaciones comerciales y las restricciones climáticas, entre otras variables..

Dentro En un modelo de programación lineal entera mixta (MILP), podemos considerar múltiples variables de negocio y limitarlas mediante una serie de restricciones para maximizar el desempeño productivo en un horizonte intertemporal determinado. Buscaremos modelar las variables comerciales más relevantes en un esquema de decisión intertemporal que maximice las ganancias dados los recursos disponibles. Consideraremos los precios del mercado local para cada categoría a lo largo del tiempo, el tipo de cambio de la moneda local y los ciclos de reproducción junto con otras dimensiones comerciales. Diseñaremos una estrategia de validación, ejecutaremos puntos de referencia y analizaremos las soluciones de resolución propuestas. Finalmente, describiremos un posible flujo de trabajo de integración en la operación actual de la empresa.

## Revisión de literatura

MILP Los modelos han demostrado ser valiosos para representar múltiples escenarios. siendo una extensión de los modelos de programación lineal donde algunas o todas las variables de decisión son números enteros en lugar de números reales. El uso de estos modelos en el ámbito de la producción agrícola tiene una larga trayectoria a nivel mundial. Particularmente en Argentina y Brasil, podemos encontrar algunas publicaciones que aplican modelos de programación lineal a diversos tipos de casos de uso.

*Optimización de la asignación de tierras entre actividades ganaderas y agrícolas Ras, C. H., Marra, R. M. A. y Tettamanti (2020).* El modelo asigna terreno a actividades limitadas por los recursos disponibles, maximizando el beneficio obtenido. Las actividades agroindustriales se definen en diferentes subetapas. La solución modelo propone duplicar la tierra asignada a la producción ganadera y adoptar una nueva actividad especializada relacionada con el aumento



de peso que aún no se está considerando. Las restricciones consideran costos, riesgo, sostenibilidad, entre otras consideraciones.

*Optimización de operaciones de transporte y cosecha multiperiodo. Filho, AA, Melo, T. y Pato, MV (2020).* En el contexto de la industria de la caña de azúcar brasileña, el modelo resuelve en un horizonte de planificación de múltiples períodos, la programación del despliegue de maquinaria y vehículos de transporte sujeta a restricciones que representan los recursos disponibles, la demanda esperada, el rendimiento de los cultivos, las condiciones climáticas y los cronogramas de trabajo. El objetivo es minimizar los costos incurridos por el equipo utilizado y el tiempo requerido para satisfacer la demanda en una función bioobjetiva. El resultado del modelo indicó implementaciones más cortas a un costo mayor, lo que llevó a una reducción de los gastos de mantenimiento de la máquina y, en última instancia, a una maximización de los ingresos generales.

*Medir y maximizar la población sostenida a partir de los recursos proporcionados por la Pampa húmeda. Frank, RG (2020).* Al evaluar la oferta per cápita de 20 productos alimenticios, este trabajo estudia cómo asignar recursos para maximizar la producción. Los resultados muestran que la región pampeana puede sustentar a poco más de 113 millones de personas siguiendo las pautas dietéticas argentinas.

*Optimización de la cadena de suministro forestal cuantificando el impacto social y ambiental. Campanella, S. R., Corsano, G. y Montagna, J. M. (2018).* El objetivo del modelo es optimizar la operación para utilizar eficientemente los residuos de madera generados determinando la ubicación, el tamaño y la cantidad producida mientras se maximiza el beneficio. La solución se implementó considerando las características de la industria forestal en la región noreste de Argentina.

*Optimización del recurso hídrico para el diseño de la cuenca del Río Negro. Gradowczyk, M. H., Jacovkis, P. M., Freisztav, A. M., Roussel, J.-M. y Tabak, EG (1990).* Este artículo presenta OPER, un modelo matemático compuesto por cuatro submodelos. El objetivo es analizar y planificar sistemas de recursos hídricos compuestos por embalses, centrales hidroeléctricas, canales de navegación, etc., situados a lo largo de un río. OPER4, un modelo de programación entera mixta, optimiza las secuencias de inversión a lo largo del horizonte temporal. Este modelo se aplicó para diseñar los recursos hídricos en el sistema de la cuenca del Río Negro en Argentina.

## Esquema de la tesis

---

**Caso de negocio.** En este capítulo describiremos el ciclo de vida del ganado y brindaremos una descripción general de las principales decisiones comerciales relacionadas con la gestión del ganado. Comenzando desde el nacimiento y progresando hasta la etapa de destete seis meses después, pasando opcionalmente a reproductora o continuar hasta alcanzar etapas de peso medio o incluso alto. Cada decisión está relacionada con un momento específico para cada clase que existe en la operación. Clasificaremos todo el ganado en tres clases: macho (Clase 1), hembra (Clase 2) o ganado designado para reproducción (Clase 3). Al final de esta sección se nos presentarán las principales variables comerciales que queremos modelar en las secciones futuras.

**Entradas de datos y consideraciones.** Aquí intentaremos describir cómo manejaremos los datos que usaremos como entrada para nuestra solución. Describiremos el procesamiento realizado a los precios del ganado y la estimación de precios futuros para un análisis de ventana de tiempo más largo. Explicaremos cómo se contabilizan los costos de mantenimiento mientras se avanza en cada paso del ciclo de vida, cuáles son los cuatro posibles momentos o etapas de venta en las que pueden ocurrir las ventas, y brindaremos mediciones y aproximaciones para envejecimiento y peso de los animales.

**Propuesta de solución y definición del modelo.** En esta sección profundizaremos en cómo funciona el MILP. modelo albergará todos los aportes mencionados y generará una solución que podamos comprender y utilizar para agregar valor comercial. Mencionaremos algunos conceptos teóricos generales relacionados con la optimización combinatoria y las técnicas de programación lineal. Definiremos los ingresos, nuestra principal métrica que buscaremos optimizar en nuestro modelo y determinaremos decisiones para maximizarlos. Finalmente especificaremos el modelo en su forma matemática, proporcionando la función objetivo, conjuntos, parámetros, variables y restricciones, y explicando sus interacciones.

**Análisis de referencia.** Dentro de este segmento delinearemos dos estrategias propuestas para validar el impacto de la solución. Mencionaremos algunas advertencias como la traducción de edades y los métodos aplicados para dar forma y controlar la solución modelo en algo que la empresa pueda utilizar de manera efectiva.

En el futuro, definiremos 19 experimentos con 6 variables que exploraremos para evaluar cómo se desempeña el solucionador en múltiples escenarios diferentes. Ejemplos de estas variables son subconjuntos del experimento en diferentes momentos históricos pasados que impactan los precios, diferentes duraciones, diferentes índices de embarazo, costos fijos de ventas y una última variable que utilizará precios constantes.

Después de ejecutar el modelo en los 19 experimentos, analizaremos el impacto en las principales dimensiones del negocio, incluido el rendimiento de ventas, las transferencias, el stock y los ingresos generados. Luego, seleccionaremos dos experimentos representativos y ejecutaremos un análisis profundo que nos lleve a comprender el fundamento de la solución óptima del solucionador y tratar de determinar la fuente del valor generado.

---

## II. Caso de negocio

### Descripción del caso concreto a tratar

En esta sección describiremos la operación ganadera a través de un ciclo completo, que comienza en septiembre cuando los recién nacidos se crían anualmente. Dependiendo de las decisiones que se tomen, el ciclo puede durar hasta casi dos años hasta completarse si se seleccionan animales para su venta en la categoría de alto peso. Durante este proceso, el ganado madurará en grupos o lotes, ganando peso y aumentando mes a mes su costo de mantenimiento. Normalmente, a determinados meses de edad, el animal alcanzará una categoría de peso en la que podrá venderse en el mercado local por un precio por kilo alcanzado. Hay tres categorías de peso definidas con un peso total de aproximadamente 165 kg, 300 kg y más de 391 kg.

La reproducción anual será posible gracias al plantel reproductor compuesto por vacas y toros previamente separados. Las vacas hembras para este propósito se seleccionan aproximadamente a los 11 meses de edad. Ellos comenzarán a reproducirse a los dos años, cada año, hasta que se vendan en una categoría especial para ganado reproductivo de mayor edad que definiremos como Etapa 4. Las vacas hembras reproductivas generalmente realizan entre uno y siete ciclos reproductivos antes de ser vendidas.

Definiremos la Clase 1 como toda la población masculina, la Clase 2 como la población femenina y la Clase 3 como la población femenina seleccionada para reproducción. Sólo las vacas de Clase 2 (hembras) pueden transferirse a la Clase 3 a los 11 meses de edad. Este proceso se describe en Figura 1. El tiempo avanza de izquierda a derecha, empezando por la reproducción.

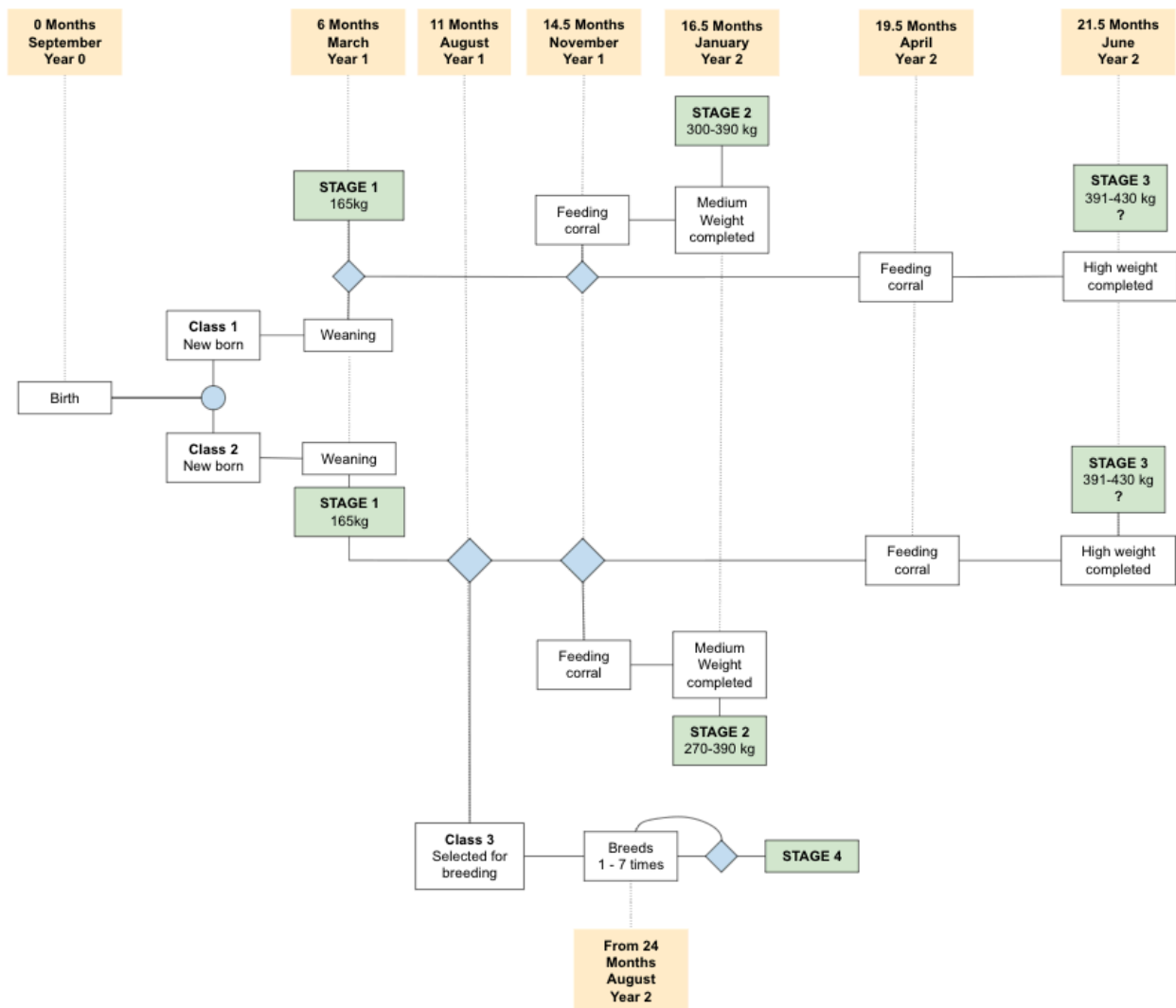


Figura 1: Árbol de decisiones empresariales del ciclo ganadero. Elaboración propia

Las vacas hembras asignadas a la reproducción dan a luz anualmente durante el mes de agosto. Esto coincide con el comienzo de la primavera, ya que las temperaturas más altas tienen un impacto positivo en el desarrollo temprano de los recién nacidos. Seis meses después, los bovinos jóvenes, tanto machos como hembras, están listos para ser separados de su madre (destete), momento en el que pueden ser vendidos (Etapa 1) o criados en el predio local.

Las ventas son posibles en cuatro etapas diferentes. El precio de cada animal se define por su peso multiplicado por el precio del kilo en la categoría en la que se vende el animal. Etapa 1 para la venta de recién nacidos entre seis y ocho meses una vez separados de su madre. Etapa 2 en la categoría de peso mediano entre 16 y 18 meses. Etapa 3 en la categoría de alto

---

peso entre 30 a 36 meses de edad. Escenario 4, sólo para vacas destinadas a reproducción que puedan venderse en cualquier edad y momento.

Para la categoría de peso medio y alto, el ganado se cría y se alimenta en un campo abierto de engorde con pasto hasta 30 días antes de ser vendido, cuando se traslada al corral de engorde. El aumento de peso por día aumenta, lo que también resulta en un mayor costo de mantenimiento durante este mes. Si el ganado se vende en la categoría de peso medio alcanza el peso completo entre los 16 y 17 meses. La categoría de peso alto se alcanza entre los meses 30 a 36 dependiendo de cuándo se traslada al corral de alimentación. Una vez que el ganado se traslada al corral de alimentación, no volverá a alimentarse con pasto abierto.

Sólo para la rama femenina, durante el mes 11 de vida la operación decide cuánto se asigna permanentemente al stock reproductor. La principal diferencia es que el ganado reproductivo permanecerá alimentándose en pasto abierto hasta que se venda, lo que tiene un costo de mantenimiento general menor que las otras clases. Todas las hembras reproductoras darán a luz cada año a partir de los dos años de edad, con una tasa de éxito promedio del 86% (la tasa es una simplificación que ampliaremos más adelante). Años más tarde, al final de su ciclo de vida, pueden venderse en la Etapa 4, por un precio de mercado específico, compuesto por la mitad del precio por kilo de la categoría de peso mediano femenino.

## ohn etapa de colaboración, evaluación y descubrimiento de negocios

El primer paso para diseñar la solución es determinar qué dimensiones comerciales son relevantes para incluir en el modelo. Una abstracción adecuada es clave, ya que no es posible ni necesario representar cada parte móvil de la operación. Evitar de esta manera diseñar un modelo que sea demasiado complejo para manipularlo y replicarlo o que sea extremadamente exigente desde el punto de vista computacional para resolverlo. Esto requiere que el analista y los representantes de la empresa trabajen juntos, recopilando definiciones comerciales clave en un proceso de refinamiento continuo que implica analizar los datos disponibles, construir suposiciones y gestionar expectativas.

En particular, este proyecto se benefició del apoyo constante de las partes interesadas de la empresa durante no menos de dos años y medio. Lo central de esta interacción es que el objetivo no es sólo probar un enfoque teórico circunscrito a este artículo sino mejorar empíricamente los procesos operativos. Los incentivos alineados permitieron la buena voluntad y el alto nivel de colaboración que se requiere para que estos proyectos tengan un impacto real, impulsando al analista a aprender profundamente las especificidades del negocio y a la

empresa a tener la mente abierta para explorar y mejorar nuevas formas de administrar sus negocios. negocio.

## Necesidades y aspiraciones estratégicas del negocio.

Las discusiones exploratorias con partes interesadas clave dentro de la organización revelaron dos necesidades cruciales. Uno de ellos tiene como objetivo determinar el equilibrio óptimo entre la expansión del stock reproductivo y la priorización de las ventas actuales. La segunda motivación es encontrar la categoría de venta óptima entre las opciones de destete, peso medio y peso alto.

El aumento del stock reproductivo actual significaría mayores rendimientos futuros considerando escenarios en los que los precios y los costos se mantienen constantes a lo largo del tiempo. En secciones futuras veremos que este no es el caso ya que tanto los precios como el costo varían significativamente con el tiempo, influenciados por una variedad de factores tanto nacionales como extranjeros. Si bien los gastos tienen un componente mixto tanto en moneda local como en dólares estadounidenses, las ventas se cotizan exclusivamente en dólares estadounidenses. Por esta razón, los cambios en el tipo de cambio de moneda impactan directamente en los ingresos. Creciente Las existencias mantenidas internamente por encima de cierto límite excederían la producción local de forraje, lo que requeriría abastecerlo de productores externos a un costo más alto.

La complejidad aumenta cuando consideramos el número de variables intertemporales entrelazadas. Es difícil diseñar y evaluar una implementación sólida de un plan de negocios a lo largo del tiempo. El desafío es mayor para las pequeñas y medianas empresas, ya que no cuentan con un equipo que pueda enfocarse en todas las facetas, especialmente para las empresas con sede en Argentina debido a las elevadas fluctuaciones macroeconómicas como es en nuestro caso.

## Data Entradas y consideraciones

**Precios.** Precio medio diario por kilo fo cada etapa de venta obtenida de [metroercadodeliniars.com.ar](http://metroercadodeliniars.com.ar). Los precios del ganado se fijan en el mercado local argentino, capturando el precio mensual del primer día hábil de ese mes. Los valores se convierten a dólares estadounidenses utilizando el tipo de cambio informal (dólar blue), tomando el valor promedio de los 7 días anteriores. Se consideró que el tipo de cambio informal normalizaba la fluctuación de los precios, ya que el gobierno local controlaba el tipo de cambio oficial como medio para controlar la inflación. Utilizar el índice de inflación local IPC para deflactar los

precios podría ser otra estrategia válida, pero la empresa optó por utilizar el dólar como principal referencia. Los precios de la etapa de destete se especifican como un 20% más que los precios de la etapa 2 femenina como definición de negocio.

Los precios se capturan a partir de enero de 2017. A partir de enero de 2023, se pronostican los precios. Los efectos estacionales de los precios se modelan utilizando el método de Holts Winter, como se muestra en la Figura 2. Este es un enfoque ingenuo en el que la idea es representar los precios estacionales durante el año y poder ejecutar puntos de referencia sobre el rendimiento de la solución durante largos períodos de tiempo.

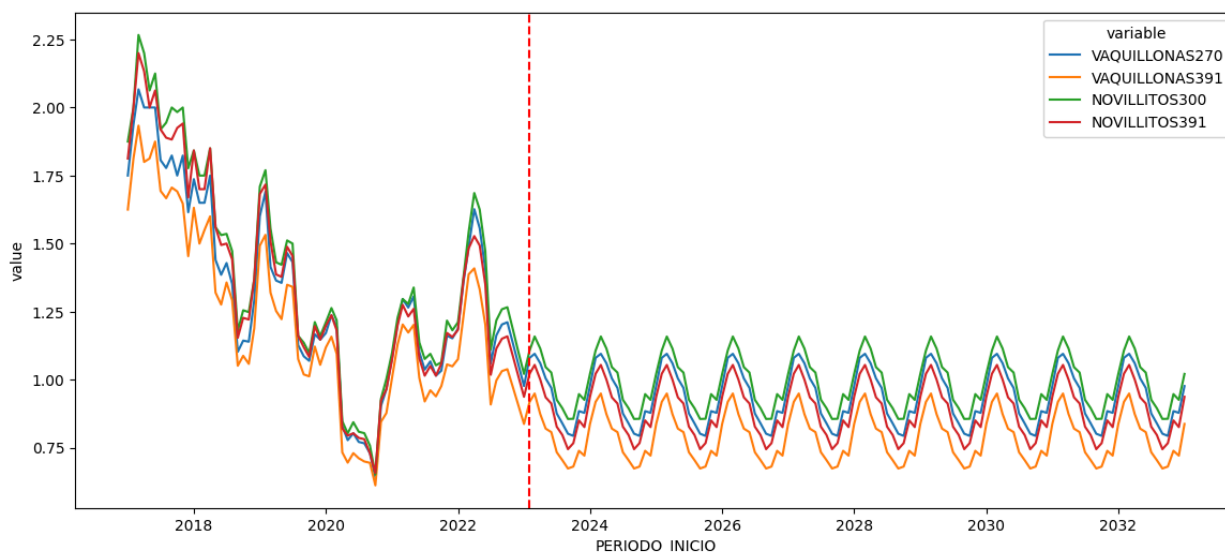


Figura 2: Precio mediano por kilo en dólares estadounidenses de enero de 2017 a enero de 2023 y previsto hasta enero de 2033. Elaboración propia. Fuente: [www.mercadodeliniers.com.ar](http://www.mercadodeliniers.com.ar) [www.dolarhoy.com](http://www.dolarhoy.com)

**Mantenimiento Costo.** Los costos revelados por la empresa estaban en forma de costos acumulados en cada posible punto de venta para cada clase de la Etapa 1 a la Etapa 4. El modelo calcula el costo por período incurrido ya que es más realista, especialmente cuando se resuelve una estructura intertemporal de período a período. Para resolver esta transformación utilizamos la interpolación B-spline de orden tres para construir una curva suave y luego calculamos la derivada de esa función. Evaluar la derivada para todos los meses requeridos nos permite obtener el costo parcial por período para todos los períodos considerados.

El ganado macho cuesta un 10% más a partir del mes 15 en adelante, esto es visible en la Figura 3, donde la clase macho muestra este aumento. El costo de la clase reproductiva es fijo ya que su ingesta de alimentos se mantiene constante durante el tiempo.



En la Figura 3 podemos ver las curvas de costos por clase superpuestas por las tres etapas de venta. Las clases de reproducción se pueden vender en cualquier momento. La Etapa de Venta 1 se lleva a cabo entre los tres y los ocho meses de edad. La segunda etapa de venta abarca de 16 a 18 meses, mientras que la tercera etapa de venta se realiza entre los meses 30 a 36.

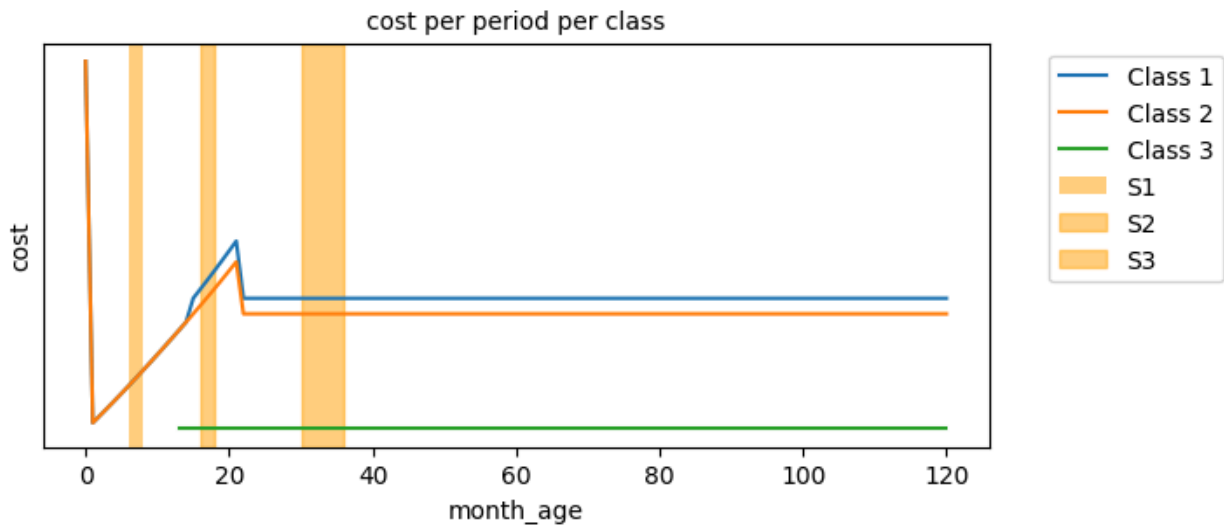


Figura 3: Costo por período por clase en dólares estadounidenses con etapas de venta. Fuente: Datos de la empresa. Se eliminaron los valores del eje Y para proteger la privacidad de los datos. Elaboración propia

Vender Clase 1 o La clase 2 de peso medio o alto implica dos curvas de costos diferentes dado que trasladamos el ganado al corral de alimentación en diferentes momentos del tiempo (dos meses antes de la venta). Como el modelo requiere solo una curva de costos por clase, una advertencia presentada es que estamos modelando que todos los animales pasan al corral en períodos de peso medio y luego aplicamos el costo de mantenimiento normal para el resto de la función de costos. Esto se representa en la pendiente ascendente y luego descendente, que en un escenario real no tendría esa pendiente descendente. En resumen, estamos trasladando el aumento de costos para la alimentación del ganado de corral de la Etapa 3 15 períodos antes. Esto se puede perfeccionar añadiendo una cuarta clase en el futuro.

**Ventas.** Las ventas están restringidas a ocurrir únicamente en la Etapa 1 a la Etapa 3 durante el ciclo de vida del animal. La etapa 4 es nuevamente solo para reproductores. Fijar los costos de venta representan el transporte de ganado., generación de trámites y ponderaciones

---

grupales, entre otros pasos necesarios durante la venta de acciones. Para evitar movimientos poco realistas de cantidades bajas, se establece una cantidad mínima de venta en diez por período para las Clases 1 y 2. Esperamos recompensar las ventas grupales de mayor cantidad que disminuyan el costo fijo por período. Las reproductoras pueden venderse en cualquier momento a la mitad del precio del kilo de la categoría femenina de peso medio. Esto podría mejorarse en el futuro, aplicando un precio decreciente cuanto más viejo sea el animal, que es precisamente la forma en que se fijan los precios.

**Edad.** Actualmente, la empresa no realiza la medición de la edad a nivel individual. Los informes de stock semanales se utilizan para mapear unidades de stock asignando animales a diferentes grupos de edad que representan su edad a lo largo del ciclo de vida del ganado. El input del modelo requiere input específico a nivel de meses de edad. Esto requiere una “traducción” que se realiza asignando aleatoriamente la edad para un intervalo dado usando distribuciones uniformes para todas las clases y una distribución normal sesgada a la derecha para la Clase 3 que represente mejor la distribución de edades entre esa clase.

**Peso.** Al igual que la edad, no es posible medir con precisión cada unidad de peso. Se realizan mediciones periódicas para cada contenedor/grupo para realizar un seguimiento del peso promedio de cada grupo. Se trata de una operación costosa y de alto riesgo que requiere la manipulación de cientos de animales de gran tamaño y su obtención a escala industrial para obtener el peso promedio del grupo. Para nuestra solución, utilizaremos el peso promedio por grupo según las últimas mediciones disponibles.

**Nacimientos.** Cada mes de agosto, por cada animal de clase reproductiva en stock que tenga 24 meses o más, se agregan 0,43 recién nacidos al stock de ambas clases. Esto se calcula multiplicando el 93% de tasa de embarazo exitoso por el 93% de tasa de destete exitoso. Luego, dividirlo por la mitad representa el cincuenta por ciento de posibilidades de tener un recién nacido masculino y femenino. Esto es una simplificación ya que el 86% es la tasa real de embarazo y 6 meses después el 86% sobrevive a la etapa de destete. Estamos aplicando una tasa de éxito del 86% directamente en la inseminación y saltando para representar casos fallidos en las etapas de destete.

**Transformaciones de datos realizadas para ocultar datos privados.** Los datos utilizados para este experimento son reales. Para proteger la información sensible relacionada con el stock y los costos por categoría, hemos realizado un escalado lineal de todas las entradas de datos en un número determinado. Los resultados en cuanto al impacto de la solución y las decisiones tomadas por cada solucionador son exactamente los mismos que si no se hubiera realizado la transformación.

# Propuesta de solución mediante optimización lineal mixta.

## Introducción

Antes de profundizar en el modelo en sí, analicemos sus componentes clave:

**Modelo:** El modelo es la representación matemática de nuestro problema empresarial a resolver. Es una abstracción que representa las relaciones entre variables de decisión y restricciones dada una entrada de datos específica, que definiremos más adelante en esta sección. El modelo está escrito en el lenguaje de modelado ZIMPL.

**Solucionador:** El solucionador se refiere a la implementación computacional del algoritmo o algoritmos aplicados para encontrar la solución que maximice nuestra función objetivo (definida en el modelo). Entre todas las soluciones factibles en el espacio de soluciones, buscamos maximizar los ingresos definidos en la función objetivo. El solucionador específico que estamos utilizando es SCIP, una herramienta de optimización no comercial tanto para programación entera mixta como para programación entera mixta no lineal. Es ampliamente utilizado y de código abierto.

El solucionador u algoritmo de optimización asignará valores a las variables de decisión y obtendrá un determinado ingreso como resultado. Las variables de decisión se limitan a decidir la cantidad a **vender**, **mantener**, y **transferir** para cada clase, edad y período cumpliendo todas las restricciones definidas en el modelo. Entre todas las soluciones factibles que satisfacen restricciones definidas, el solucionador explora eficientemente el espacio de búsqueda factible tratando de encontrar la solución óptima que maximice ganancia.

Los ingresos se calculan y representan en la función objetivo para cada período como **acciones vendidas** multiplicado por su precio menos **stock mantenido** en ese período multiplicado por su costo de mantenimiento. El costo de mantenimiento puede existir con o sin ventas en un período particular. Un término independiente que representa ponderaciones de costos fijos de ventas para períodos en los que se realizan ventas para cada edad y clase vendida, que representa costos de manipulación y operación administrativa. La suma de todos los períodos de dicha función objetivo se resume para **los ingresos totales**.

Cuando nosotros **vender**, habrá un específico **precio** para esa edad, período y clase. Cuando nosotros **mantener stock**, pagaremos un mantenimiento **costo** específico para el período, edad y clase.

---

Precio, costos y **existencias iniciales** son entradas de datos que le damos al modelo con otros parámetros como edad máxima permitida, cantidad mínima de venta permitida por mes, costo de venta fijo por mes, índice de embarazo, mes de venta habilitado, meses por clase (Etapas 1 a 4), entre otros.

## Modelo

### Conjuntos

$T(\text{Periods})$  Representa periodos de tiempo discretos, desde 1 hasta un periodo máximo, en los que se toman decisiones sobre el manejo del ganado. A lo largo de la definición del modelo, usaremos el subíndice "t" para referirnos a elementos de este conjunto.

$T0(\text{Periods})$  Representa periodos de tiempo discretos, desde 0 hasta un periodo máximo, utilizaremos el subíndice "t" para referirnos a elementos de este conjunto. Se diferencia del conjunto anterior al incluir el 0, ya que se utilizará para definiciones de dominios variables en lugar de restricciones como el conjunto anterior.

$E(\text{Ages})$  Abarca las edades posibles de los animales desde -1 hasta una edad máxima determinada (`animal_max_age`). Usaremos el subíndice "e" para referirnos a elementos de este conjunto. Necesitamos definir e a partir de -1 porque el período inicial es 0 y la función objetivo establece una relación con e-1, que es el período -1.

$C(\text{Class})$  Representa lo considerado clases de ganado, con valores 1, 2 y 3. La Clase 1 representa el stock macho, la Clase 2 denota el stock hembra y la Clase 3 caracteriza el stock hembra seleccionado para reproducción. De manera similar, usaremos el subíndice "c" para referirnos a elementos de este conjunto.

### Parámetros

$\text{cost}[t, e, c]$  Define el costo asociado con los animales de una edad particular e, clase c y período t.

$price[t, e, c]$  Indica el precio de venta de los animales para cada edad  $e$ , clase  $c$  y período  $t$ .

$initial\_stock[e, c]$  Especifica el stock inicial de animales para cada edad  $e$  y clase  $c$  en el período inicial.

$sell\_1$  como las edades en las que se puede comercializar el ganado Etapa 1 que en nuestro caso particular es entre los 6 y 8 meses de edad.

$sell\_2\_3$  como las edades en las que se puede comercializar ganado Etapa 2 y Etapa 3, en nuestro caso son los meses 16 a 18 y 30 a 36.

$preg\_rate$  como la tasa media de éxito de preñez para las hembras reproductivas.

$min\_sell\_c1\_c2$  como la cantidad mínima de venta requerida para la Clase 1 y la Clase 2 por período. En caso de que se realicen ventas, se establece una cantidad mínima para esa operación.

$max\_sell\_c1\_c2$  como la cantidad máxima de venta permitida en ese período. Se define como auxiliar para establecer el funcionamiento de la 8ª restricción de “ventas mínimas”.

$max\_periods$  como el número total de períodos y el último período disponible en el modelo.

$not\_august\_periods$  como una lista de períodos que no son agosto, en los que no se producirán nacimientos.

$august\_periods$  así como la lista de períodos que corresponden al mes de agosto, en los que se producirán los nacimientos.

$sell\_fix\_cost$  como un costo de venta fijo para cada período y edad y clase con ventas existentes. Esto representa los gastos generales administrativos, de manipulación y de transporte de una operación de ventas. Este costo es mayor cuanto más distintos tipos de acciones se venden dentro de ese período.

## **variables**

$x[t, e, c]$  como stock disponible en cada período  $t$  en  $T$ , en cada edad  $e$  en  $E$ , para cada clase  $c$  en  $C$ .

$y[t, e, c]$  como ventas en cada período  $t$  en  $T$ , en cada edad  $e$  en  $E$ , para cada clase  $c$  en  $C$ .

$w[t, e]$  como las transferencias de la Clase 2 a la Clase 3 en cada período  $t$  en  $T$ , en cada edad  $e$  en  $E$ .

$n[t, c]$  como el número de nacimientos en cada período  $t$  en  $T$  para cada clase  $c$  en  $C$ .

$s[t]$  como un variable binaria que denota si las ventas ocurren en ese período, para cada período  $t$  en  $T$ .

$k[t]$  como una variable binaria que permite ventas cuando no hay nacimientos para las restricciones 26 y 27 (definidas en la sección “Estrategia de referencia 2: línea de base empresarial frente a solución optimizada”).

$l[t]$  como variable binaria que permite transferencias cuando no hay nacimientos por restricción 28 (definido en la sección “Estrategia de referencia 2: línea de base empresarial frente a solución optimizada”).

### **Función objetiva**

$$\sum_{t,e,c \in T,E,C} y[t, e, c] * \text{price}[t, e, c] - x[t, e, c] * \text{cost}[t, e, c] - s[t] * \text{sell\_fix\_cost}$$

El objetivo del modelo es maximizar las ganancias, calculadas como la suma de los ingresos por ventas menos el costo de mantenimiento y los costos fijos asociados con las ventas.

### **Restricciones de no negatividad**

$$\forall \langle t, e, c \rangle \in T0 \times E \times C : x[t, e, c] \geq 0 \quad (1)$$

$$\forall \langle t, e, c \rangle \in T0 \times E \times C : y[t, e, c] \geq 0 \quad (2)$$

$$\forall \langle t, e \rangle \in T0 \times E : w[t, e] \geq 0 \quad (3)$$

$$\forall \langle t \rangle \in T0 : n[t] \geq 0 \quad (4)$$

### **Restricciones de flujo**

Ecuación de conservación del flujo - Clase 1

$$\forall \langle t, e \rangle \in T \times E \text{ with } e > 0 : x[t, e, 1] = x[t - 1, e - 1, 1] - y[t - 1, e - 1, 1] \quad (5)$$

### Ecuación de conservación del flujo - Clase 2

$$\forall \langle t, e \rangle \in T \times E \text{ with } e > 0 : x[t, e, 2] = x[t - 1, e - 1, 2] - y[t - 1, e - 1, 2] - w[t - 1, e - 1] \quad (6)$$

### Ecuación de conservación del flujo - Clase 3

$$\forall \langle t, e \rangle \in T \times E \text{ with } e > 0 : x[t, e, 3] = x[t - 1, e - 1, 3] - y[t - 1, e - 1, 3] + w[t - 1, e - 1] \quad (7)$$

Las restricciones 5, 6 y 7 establecen la relación lógica entre presente, pasado y futuro para las tres clases, dando a nuestro modelo una sensación de tiempo. Estamos obligando a que el stock actual se defina como stock disponible en el período anterior menos las ventas y transferencias del período anterior.

## Restricciones de ventas

### Ventas Mínimas

$$\forall t \in T : \sum_{e, c \in E \times C \text{ with } c \neq 3} y[t, e, c] \geq \text{min\_sell\_c1\_c2} \cdot s[t] \quad (8)$$

### Ventas máximas

$$\forall t \in T : \sum_{e, c \in E \times C \text{ with } c \neq 3} y[t, e, c] \leq \text{max\_sell\_c1\_c2} \cdot s[t] \quad (9)$$

### Sin ventas en el último período

$$\forall \langle e, c \rangle \in E \times C : y[\text{max\_periods}, e, c] = 0 \quad (10)$$

### Conectar ventas con stock disponible

$$\forall \langle t, e, c \rangle \in T \times E \times C : y[t, e, c] \leq x[t, e, c] \quad (11)$$

No hay ventas con precio cero.

$$\forall \langle t, e, c \rangle \in T \times E \times C : \text{if } (\text{price}[t, e, c] \leq 0) \text{ then } y[t, e, c] = 0 \quad (12)$$

La restricción 8 exige que, si se realizan ventas, estas deben ser al menos por una determinada cantidad mínima. *min\_sell\_c1\_c2* tanto para la Clase 1 como para la Clase 2. La Restricción 9 complementa la Restricción 8 basándose en un límite máximo de venta virtual definido como tres veces el stock inicial total.

La restricción 10 prohíbe las ventas en el período final, esto evita las ventas del último período que podrían cumplir con los requisitos de existencias finales, como las restricciones 15, 16, 26, 27 y 28. La restricción 11 obliga a que las ventas sean menores que las existencias existentes disponibles. Finalmente, la restricción 12 niega las ventas a precio cero (relacionadas con la generación de insumos del modelo) y solo permite ventas durante edades específicas de animales que están relacionadas con las etapas de venta.

### Restricciones de stock

Conjunto de existencias inicial

$$\forall \langle e, c \rangle \in E \times C : x[0, e, c] = \text{initial\_stock}[e, c] \quad (13)$$

Prohibir acciones con antigüedad negativa.

$$\forall \langle t, c \rangle \in T \times C : x[t, -1, c] = 0 \quad (14)$$

Terminar con al menos tanto ganado Clase 3 como en el primer período.

$$\sum_{e \in E} x[0, e, 3] \leq \sum_{e \in E} x[\text{max\_periods}, e, 3] \quad (15)$$

Terminar con al menos tantos bovinos jóvenes de Clase 3 como en el primer período.

$$\sum_{e \in E \text{ with } e < 30} x[0, e, 3] \leq \sum_{e \in E} x[\text{max\_periods}, e, 3] \quad (\text{dieciséis})$$



La restricción 13 establece el stock inicial de los insumos cargados. La restricción 14 prohíbe el stock de edad negativa como un caso particular que no está cubierto por las restricciones 5, 6 y 7. La restricción 15 restringe que el stock final de animales de la Clase 3 sea al menos del mismo nivel que el stock inicial de la Clase 3 para todas las edades. La restricción 16 repite la 15 para un subconjunto de vacas reproductoras de menos de 30 meses, lo que garantiza que el ciclo económico sea posible en el futuro mientras que la proporción de vacas más jóvenes en la Clase 3 se mantenga relativamente estable.

### Restricciones de transferencias

Transferencias de control

$$\forall \langle t, e \rangle \in T \times E : w[t, e] \leq x[t, e, 2] - y[t, e, 2] \quad (17)$$

Prohibir transferencias en el período inicial.

$$\forall e \in E : w[0, e] = 0 \quad (18)$$

Permitir transferencias solo a los 11 meses de edad

$$\forall \langle t, e \rangle \in T \times E \text{ with } e \neq 11 : w[t, e] = 0 \quad (19)$$

La restricción 17 obliga a que las transferencias sean iguales o menores que las existencias disponibles menos las ventas en ese período. La restricción 18 prohíbe transferencias en el período inicial 0 como caso especial que controla comportamientos no deseados. La restricción 19 prohíbe los traslados para todas las edades excepto la 11.

### Limitaciones de nacimientos

Prohibir los nacimientos en el período inicial.

$$\forall c \in C : n[0, c] = 0 \quad (20)$$

Nacimientos de Clase 1 para animales de Clase 3 mayores de dos años

$$\forall t \in \text{august\_periods} : n[t, 1] = \sum_{e \in E \text{ with } e \geq 24} x[t, e, 3] * \text{preg\_rate}/2 \quad (21)$$

Nacimientos de Clase 2 para animales de Clase 3 mayores de dos años

$$\forall t \in \text{august\_periods} : n[t, 2] = \sum_{e \in E \text{ with } e \geq 24} x[t, e, 3] * \text{preg\_rate}/2 \quad (22)$$

Limitar los nacimientos para la Clase 1 y la Clase 2 a ciertos meses

$$\forall \langle t, c \rangle \in \text{not\_august\_periods} \times C : n[t, c] = 0 \quad (23)$$

Prohibir nacimientos de clase 3

$$\forall t \in T : n[t, 3] = 0 \quad (24)$$

Los nacimientos definen la edad cero del stock excepto en el periodo inicial

$$\forall \langle t, c \rangle \in T \times C \text{ with } t > 0 \text{ and } c \neq 3 : x[t, 0, c] = n[t, c] \quad (25)$$

La restricción 20 prohíbe los nacimientos en el período inicial, para evitar comportamientos no deseados. Las restricciones 21 y 22 permiten nacimientos para cada vaca reproductora existente mayor de 23 meses de edad, los animales `preg_rate` de Clase 1 y Clase 2 se agregarán al stock en ese período para cada vaca lista para nacer. La restricción 23 prohíbe los nacimientos en meses distintos de agosto. La restricción 24 prohíbe los nacimientos de Clase 3, evitando así comportamientos no deseados. La restricción 25 obliga a que el stock de edad cero se defina únicamente por los nacimientos, excepto en el período inicial.

### III. Análisis de referencia

En esta sección describiremos dos estrategias diseñadas para analizar y validar las soluciones del solucionador. Tras este análisis debemos ser capaces de entender si nuestra solución aporta valor empresarial o no, en qué escenarios funciona y cómo se adapta a los cambios de entorno.

Como utilizamos datos reales, la principal métrica que vamos a estudiar son los ingresos, ya que es conveniente y al mismo tiempo consideramos otras dimensiones como los cambios en la asignación de existencias, la distribución de ventas, la reproducción y las transferencias.

#### Estrategia de referencia 1: operación anterior del negocio versus solucionador

Este primer intento de estrategia de referencia fue mapear decisiones comerciales reales pasadas y replicar las mismas configuraciones de entrada para el modelo, obtener los ingresos obtenidos de ambos y comparar durante múltiples ventanas de tiempo. Esta estrategia no logró garantizar la comparabilidad entre el negocio y el modelo, ya que hubo que implementar suposiciones y realizar traducciones de datos ruidosas que hicieron que el análisis fuera más complejo que valioso. Sin embargo, se obtuvieron tres lecciones notables del proceso, que son interesantes desde el punto de vista de la modelización.

**Fin del mundo.** A medida que el solucionador optimiza dado el período de tiempo modelado, tenderá a vender todas las existencias posibles (incluidas las de reproducción) antes o durante el último período. Esto puede generar ruido y conclusiones no deseadas. Para solucionar esto, se agregaron períodos adicionales de amortiguación al experimento del modelo para retrasar el efecto del fin del mundo y obtener conclusiones sólidas. Esto se complementó con el cálculo manual de los ingresos del experimento antes de que se alcancen los períodos de reserva. Incluso con períodos de amortiguamiento, el efecto del fin del mundo se minimiza, pero sigue siendo relevante y aún debe tenerse en cuenta.

**Traducción de edad.** En el último período, todas las existencias del lado comercial existen en una categoría específica que tiene un precio de venta y un costo asociado, no hay cantidades "intermedias" en el informe de existencias comerciales. De otra manera, el modelo generalmente terminará con algunas unidades de stock a una edad que no tiene precio asociado y por lo tanto no se puede vender directamente (especialmente cuando se agregan

---

períodos de amortiguamiento). La estrategia simple aplicada para resolver esto fue "moverlo" a la etapa de venta más cercana y usar ese precio y costo, a veces hacia arriba en el ciclo de vida y otras hacia abajo, dependiendo de cuál esté más cerca.

**Precios informados por Solver.** Los propietarios de empresas desconocen los precios futuros, por lo que las decisiones se toman en función de los precios futuros esperados. En cambio, el solucionador optimiza el conocimiento de los precios para todos los períodos, lo cual es una ventaja en comparación con las elecciones humanas pasadas. Las posibles soluciones eran pronosticar precios futuros para que sirvieran como entrada para el solucionador o agregar algo de ruido a los precios de entrada del solucionador y, en su lugar, calcular los ingresos sobre los precios reales.

Los problemas antes mencionados llevaron a otra estrategia que se describe en la siguiente sección.

## Estrategia de referencia 2: línea base del negocio vs. solución optimizada

Si pudiéramos sintetizar la toma de decisiones empresariales del día a día en heurísticas generales que pudiéramos abstraer en restricciones del modelo, entonces podríamos comparar esta configuración con un solucionador sin restricciones en un punto de referencia más elegante con menos o ningún problema de comparabilidad.

Después de discutir con los dueños de negocios, podrían describir tres reglas que representan cómo administran sus existencias y flujos de ventas. Las heurísticas compartidas se expresaron de la siguiente manera:

*“De todas las recién nacidas durante el ejercicio, el 30% se vende en etapa temprana (Etapas 1), el 30% se vende entre las Etapas 2 y 3, y el 40% restante se guarda para reproducción”.*

Estas reglas están representadas por las siguientes restricciones y solo se aplicarán al modelo variante de referencia que compararemos con el modelo gratuito.

### **Restricciones heurísticas de nacimientos**

30% de nacimientos a ventas en la etapa 1

$$\forall t \in \text{august\_periods with } t + 6 \leq \text{max\_periods} : \\ n[t, 2] \cdot 0.3 = \sum_{v \in \text{sell.1}} y[t + v, v, 2] \cdot k[t] \quad (26)$$

30% de nacimientos a ventas en las Etapas 2 y 3

$$\forall t \in \text{august\_periods with } t + 16 \leq \text{max\_periods} : \\ n[t, 2] \cdot 0.3 = \sum_{v \in \text{sell.2-3}} y[t + v, v, 2] \cdot k[t] \quad (27)$$

40% de los nacimientos asignados a la Clase 3

$$\forall t \in \text{august\_periods with } t + 11 \leq \text{max\_periods} : \\ n[t, 2] \cdot 0.4 = w[t + 11, 11] \cdot l[t] \quad (28)$$

Recuerda que lo haremos restringir ambos modelos para terminar el ejercicio con la misma cantidad o más de clase reproductiva que recibieron durante el período inicial. Esto obliga a ambos modelos a evitar una solución que no permita que el negocio siga funcionando en el futuro. Esta estrategia controla el efecto del fin del mundo, limitando las ventas en los períodos finales a no menos que los niveles de existencias iniciales.

Como un modelo es más restringido que el otro, siempre esperaremos que el valor de la función objetivo menos restringido sea mayor. La clave estará en comprender tanto la magnitud de la diferencia como cómo se obtiene esa diferencia con respecto a las llamadas de negocios, en múltiples entornos.

## Análisis de resultados de referencia

Definimos una serie de 19 instancias. basado en una grilla de configuraciones que nos permite evaluar el impacto del modelo en múltiples escenarios. Las instancias están dadas por

configuraciones específicas en las que vamos a comparar los resultados de la variante libre con los resultados de la variante de referencia, por lo que cada una se compone de dos variantes.

Las configuraciones que exploramos son las siguientes y están representadas en la Figura 4:

- **experimento:** instancia etiqueta que declara la configuración y diferencia esa instancia específica de las otras 18 instancias.
- **fecha de inicio:** establece la fecha donde comenzará la instancia.
- **fecha final:** fecha de finalización de la instancia.
- **periodos:** número de períodos (meses) entre la fecha de inicio y la fecha de finalización.
- **fijar precios:** Dado el alto Debido a la variabilidad de los precios de un período a otro, explorar este entorno nos permite evaluar el impacto sin la influencia de las variaciones de precios. Esto se hace manteniendo constantes los precios de venta en el período inicial durante todo el experimento.
- **Función objetivo libre MILP:** Valor de la solución de la función objetivo para el modelo que no está restringido por las restricciones heurísticas de negocio.
- **lp hora función objetivo:** Valor de la solución de la función objetivo para el modelo de referencia.
- **impacto relativo:** cambio relativo o diferencia porcentual entre la solución libre en comparación con la solución restringida de referencia. Esto muestra cuánto valor económico relativo ha obtenido la solución sin restricciones en comparación con la otra solución. La fórmula se define como:

$$Relative\ Impact = \frac{\sum_{t \in periods} Objective\ Free_t - \sum_{t \in periods} Objective\ baseline_t}{\sum_{t \in periods} Objective\ baseline_t}$$

**Configuraciones menores:** las siguientes tres configuraciones menores se aplican a algunas de las instancias y se especifican en el nombre de la instancia. Esta configuración es:

- **Precios previstos:** instancias denominados con 'fcst' utilizan precios pronosticados como parte de la entrada de datos de enero y posteriores. Para pronosticar los precios utilizamos un modelo de Holts Winter sin tendencia (sin tendencia). Esto nos permite realizar experimentos en más períodos además de nuestros datos de precios existentes.
- **fix\_sales\_cost\_100** se refiere a casos en los que el costo fijo de ventas aumenta de 10 a 100. Este escenario podría representar un aumento en los costos administrativos y de manejo del ganado.
- **índice\_p** modifica el índice de preñez del 86% al 70% representando un caso donde la crianza de vacas es más difícil. Esto impactaría las transferencias requeridas para cumplir con las restricciones de sostenibilidad empresarial, entre otros factores.

Recuerde que la única diferencia entre ambos modelos es que el modelo de referencia aplica las tres restricciones adicionales que reflejan la forma en que los dueños de negocios toman manualmente las decisiones, es decir, de todas las mujeres recién nacidas:

- El 30% se vende en la Etapa 1,
- El 30% se vende entre las Etapas 2 y 3,
- El 40% se transfiere al plantel reproductor cuando tiene edad suficiente.

## **Resultados de referencia**

experiment	start_date	end_date	periods	fix_prices	lp_free_objective_func	lp_baseline_objective_func	relative impact
2019_24periods	18/01/2019	08/01/2021	24	FALSE	138,960	135,881	0.023
m2019_24periods	07/06/2019	03/06/2021	24	FALSE	214,763	174,783	0.229
2020_24periods	03/01/2020	06/01/2022	24	FALSE	155,077	147,267	0.053
2019_36periods	18/01/2019	06/01/2022	36	FALSE	180,379	157,766	0.143
2019_42periods	18/01/2019	02/06/2022	42	FALSE	275,843	201,437	0.369
2019_48periods	18/01/2019	05/01/2023	48	FALSE	239,279	206,043	0.161
2019_24periods_fix_prices	18/01/2019	08/01/2021	24	TRUE	276,975	245,771	0.127
m2019_24periods_fix_prices	07/06/2019	03/06/2021	24	TRUE	419,392	341,765	0.227
2020_24periods_fix_prices	03/01/2020	06/01/2022	24	TRUE	386,107	358,127	0.078
2019_36periods_fix_prices	18/01/2019	06/01/2022	36	TRUE	383,903	313,586	0.224
2019_42periods_fix_prices	18/01/2019	02/06/2022	42	TRUE	492,248	367,824	0.338
2019_48periods_fix_prices	18/01/2019	05/01/2023	48	TRUE	506,185	395,788	0.279
2019_120periods_fcst	18/01/2019	08/01/2029	120	FALSE	442,013	313,385	0.41
2019_120periods_fix_prices_fcst	18/01/2019	08/01/2029	120	TRUE	2,377,258	1,191,302	0.996
2023_24periods_fcst_no_trend	05/01/2023	05/01/2025	24	FALSE	49,024	46,298	0.059
2023_48periods_fcst_no_trend	05/01/2023	05/01/2027	48	FALSE	93,886	73,026	0.286
2023_72periods_fcst_no_trend	05/01/2023	05/01/2029	72	FALSE	134,147	94,211	0.424
2019_24periods_p_index_70	18/01/2019	08/01/2021	24	FALSE	134,479	131,268	0.024
2019_24periods_fix_costs_100	18/01/2019	08/01/2021	24	FALSE	136,680	133,469	0.024

Figura 4: Configuración de instancia con los resultados obtenidos. Elaboración propia, valores de la función objetivo final redondeados a miles.

En las siguientes secciones exploraremos las relaciones entre las variables de decisión existentes y los entornos experimentales descritos. El objetivo es obtener una comprensión general de cómo estos diversos escenarios están impactando las soluciones obtenidas. Durante la optimización, el solucionador explora un espacio de búsqueda que va desde 21,497 variables en los experimentos de 24 períodos hasta 104,057 variables en los experimentos de 120 períodos.

El plan es primero confirmar que el modelo se está comportando razonablemente de acuerdo con los criterios comerciales y no obtener ingresos aprovechando un defecto en la definición del modelo. Durante el transcurso de este proyecto, se invirtió un esfuerzo considerable en ajustar y perfeccionar el modelo para representar correctamente el problema empresarial.

Posteriormente, para validar el modelo y obtener un conocimiento más profundo sobre el funcionamiento interno de las soluciones propuestas, querríamos examinar las variables de decisión por separado y luego investigar las asociaciones y correlaciones entre ellas. Es clave identificar la lógica subyacente que guía al solucionador para capturar ingresos teóricos y al mismo tiempo detectar la fuente o fuentes principales. Esto nos permitirá establecer un modelo de competencia para generalizar teóricamente y adaptarnos a múltiples entornos. Este es el primer paso para crear una herramienta flexible que los tomadores de decisiones empresariales puedan utilizar para ayudarlos a mejorar sus operaciones.



Para facilitar la lectura del análisis, salvo que se especifique lo contrario, mantenemos la relación de comparación desde el punto de vista de la variante libre. Por ejemplo, si indicamos un aumento del 20% en una determinada variable, esto significa que la variante libre está proponiendo un aumento del 20% respecto a la base.

## Análisis de la función objetiva

El valor de la función objetivo describe los ingresos obtenidos en el ejercicio, expresados en dólares estadounidenses. Dentro de cada uno de los En 19 casos, cada variante (básica y gratuita) generará un valor de función objetivo. En esta sección exploraremos la diferencia relativa entre ellos.

Los resultados revelan un impacto positivo mínimo del 2% y máximo del 96% con un valor mediano del 22,4%. Excluyendo el valor atípico exhibido en la instancia "2019\_120periods\_fix\_prices\_fcst", podemos interpretar que el impacto positivo gira alrededor del 0 % al 40 % como se describe en la Figura 5-1.

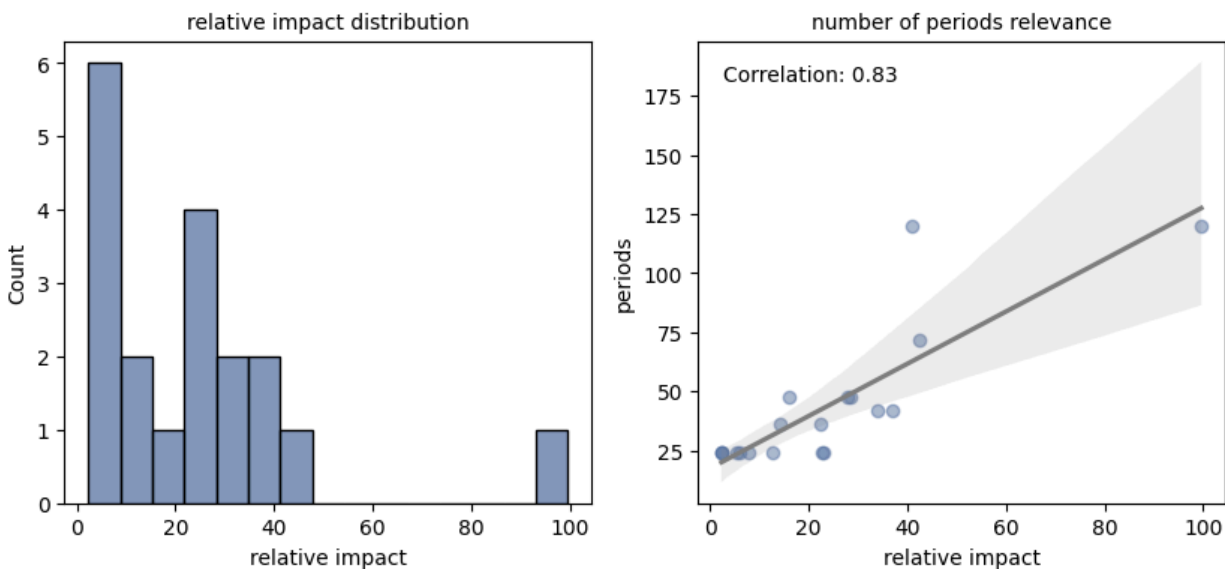


Figura 5-1: Distribución relativa del impacto. Figura 5-2: Distribución relativa del impacto versus períodos totales de instancias.

Elaboración propia

El caso atípico "2019\_120periods\_fix\_prices\_fcst" logra un impacto relativo del 99 % porque las configuraciones fijan los precios en enero de 2019, lo que mantiene precios relativos más altos en comparación con la tendencia de precios variables que se muestra en la Figura 2. Esto

permite la optimización durante una duración más larga (en comparación con otros experimentos) y en un precio más alto, lo que lleva a mayores ingresos. Este incremento no se refleja en la otra variante de 120 períodos con precios variables, que sólo alcanza un impacto relativo del 41%.

YLa evidencia muestra que las ejecuciones más largas parecen establecer un impacto mayor, como se muestra en la figura 5-2, con un coeficiente de correlación de Pearson entre el impacto relativo y el número de períodos experimentales de 0,83. Para comprender cómo opera esta diferencia a lo largo del tiempo, la Figura 6 contiene un gráfico de líneas por instancia que muestra la suma acumulada de la diferencia absoluta de la función objetivo entre variantes. La línea sobre cero significa que la variante gratuita está acumulando un valor más alto en ese período específico en el eje horizontal. Puede darnos una idea de cómo cada variante compite período tras período para maximizar los ingresos.

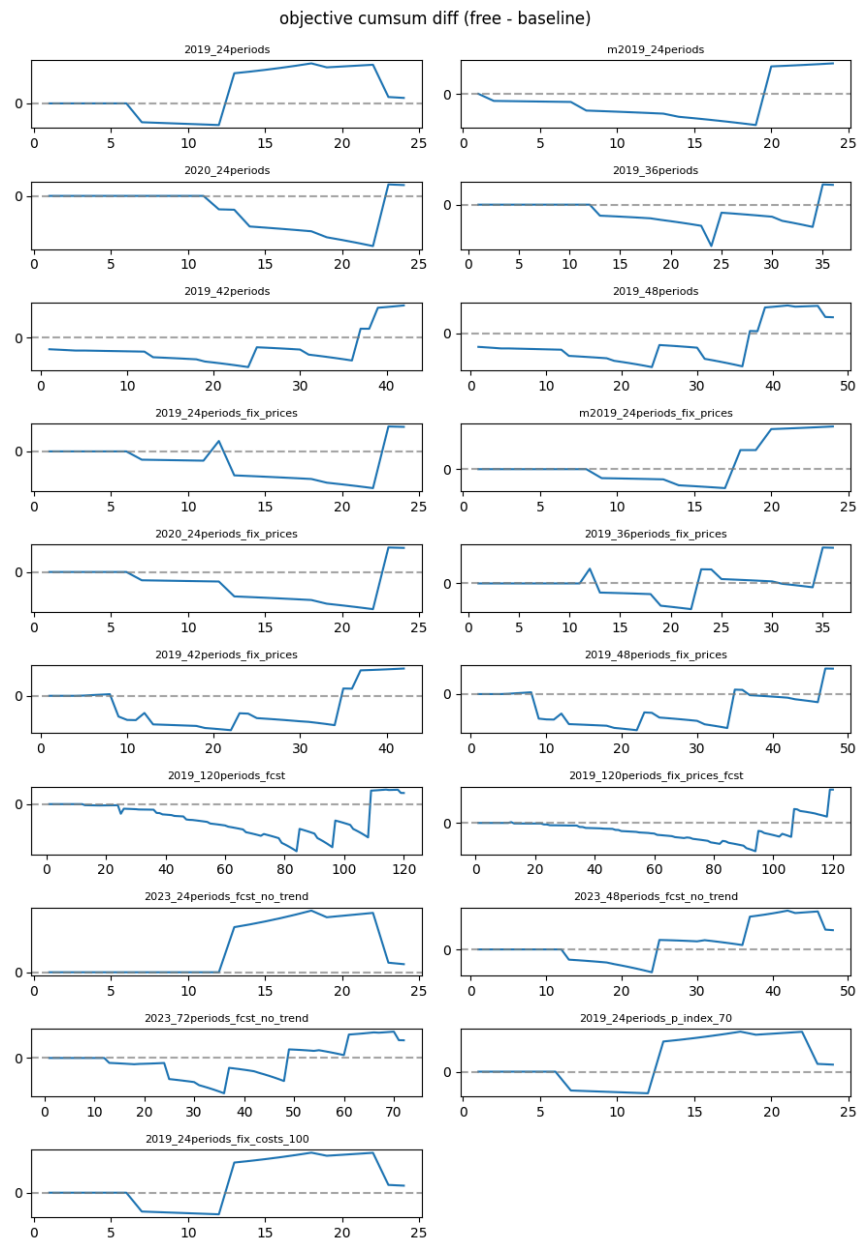


Figura 6: Diferencia absoluta acumulada de la función objetivo entre variantes por instancia a través de períodos.  
Elaboración propia

Excepto en el caso “2023\_24periods\_\_fcst\_no\_trend”, siempre hay un subconjunto de períodos en los que la variante base acumula más ingresos, para luego ser superada por la variante gratuita. Esto indica un patrón de retrasar los ingresos actuales hacia períodos posteriores.

La diferencia de ingresos surge durante la segunda mitad de todos los casos.. La transición de negativo a positivo ocurre principalmente en el último 20% de los períodos, como muestra la Figura 7. Esto pone de relieve que estos períodos son muy relevantes para dar forma al

impacto global dentro de cada instancia. Podemos concluir que las variantes gratuitas están acumulando menos ingresos durante la primera mitad de los experimentos, que luego son superados por los ingresos que obtienen en la segunda mitad, lo que marca una diferencia positiva con respecto a las variantes de referencia. Esto probablemente esté relacionado con mayores costos iniciales relacionados con el aumento del stock reproductivo hacia una mayor tasa de retorno en períodos futuros.

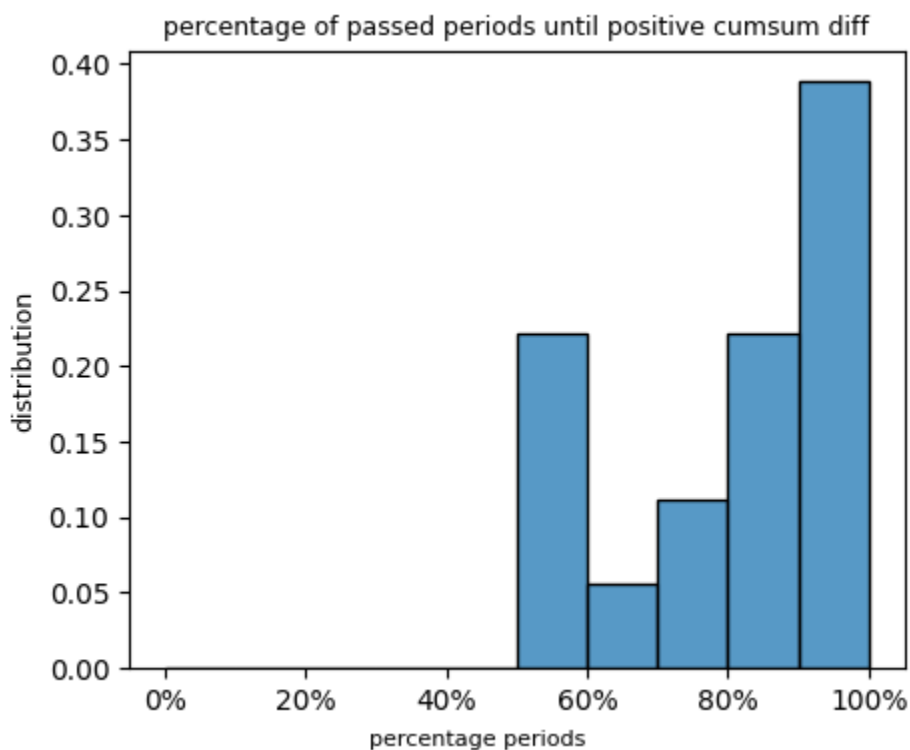


Figura 7: Porcentaje de períodos transcurridos hasta obtener una ventaja positiva de la variante libre. Elaboración propia

## Análisis de ventas

En esta sección exploraremos cómo se resuelven las ventas. Teniendo en cuenta que podemos vender en cuatro etapas diferentes durante la duración del experimento, en las Figuras 8a y 8b podemos examinar qué etapa fue la preferida entre las variantes. La segunda figura aísla las instancias de 120 períodos para representar mejor las dimensiones. Calculamos la diferencia entre cada etapa de venta para cada instancia. Las barras hacia los valores negativos del eje x representan más ventas gratuitas en comparación con la línea de base para esa etapa.

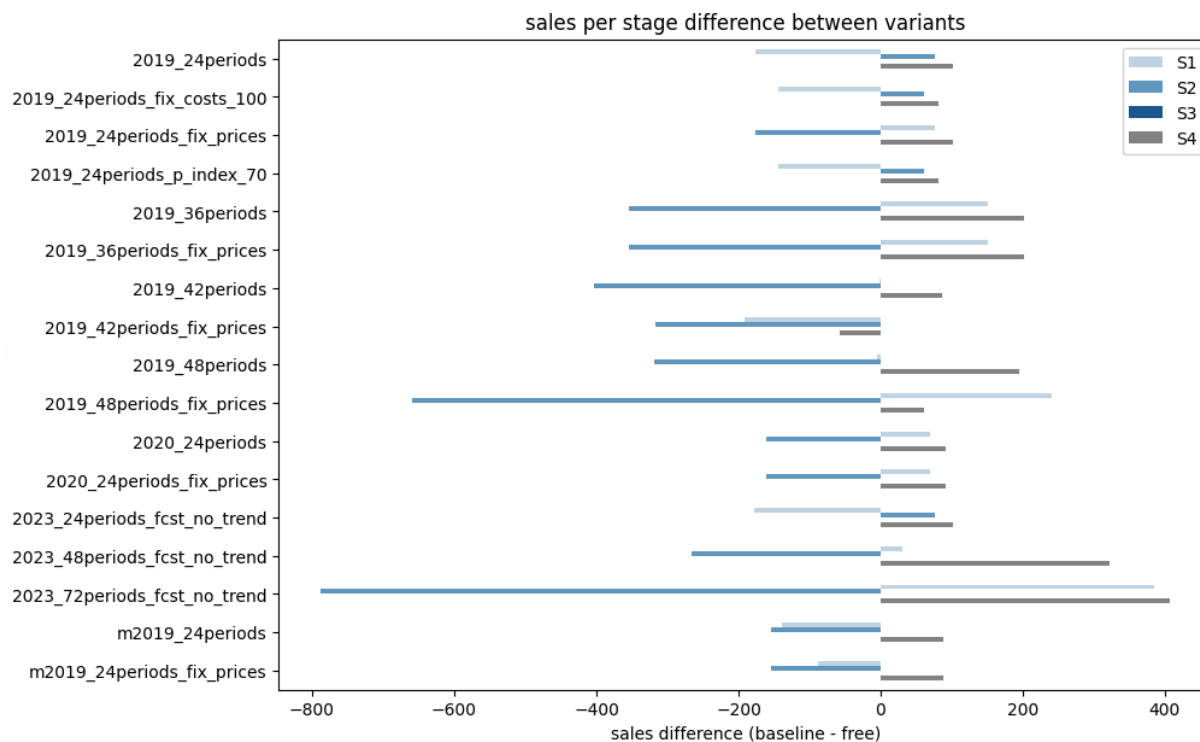


Figura 8a: Cambio de ventas por etapa entre variantes para cada instancia. Elaboración propia

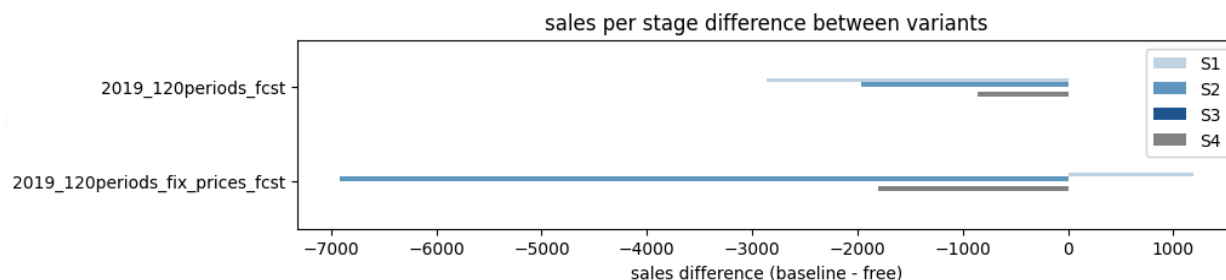


Figura 8b: Cambio de ventas por etapa entre variantes para cada instancia. Elaboración propia

Existe un intercambio general entre vender más en las etapas 2 y 3 con la contraparte de vender menos en la etapa 4. Las ventas de la etapa 1 varían según la instancia. Esto significa que la variante básica vende más animales reproductivos (a un precio menor) que las variantes gratuitas.

Esto se puede explicar porque reglas heurísticas asignar consistentemente el 30% de las recién nacidas hembras al plantel reproductivo. Este stock excede el requisito de mantener al menos el stock reproductivo dado en el período inicial al final de la instancia. Este exceso

permite que las ventas de animales reproductores aumenten los ingresos (incluso a un precio reducido en comparación con las otras etapas).

Hay dos casos que no siguen este razonamiento y generan más ventas en la Etapa 4, siendo ambos casos de 120 períodos descritos en la Figura 8b. Aparentemente, con suficientes ciclos de reproducción (uno por año) disponibles durante la duración de la instancia, se puede obtener un impacto positivo en los ingresos aumentando el stock reproductivo a medida que aumenta las ventas futuras. Esto potencialmente compensa la pérdida de ingresos por el precio reducido del ganado reproductivo en la Etapa 4.

En resumen, existe una clara diferencia entre cómo se realizan las ventas. La primera conclusión es que las ventas de la Etapa 4 son menores excepto en las dos variantes más largas. La segunda conclusión es entonces que la duración de la instancia puede potencialmente afectar la composición de las ventas.

## Transferir análisis

En esta sección exploraremos las transferencias. Es decir, la cantidad de ganado de Clase 2 (hembras) que se transfiere a ganado de Clase 3 (reproductiva). Este cambio se puede realizar únicamente a los 11 meses de edad y es irreversible.

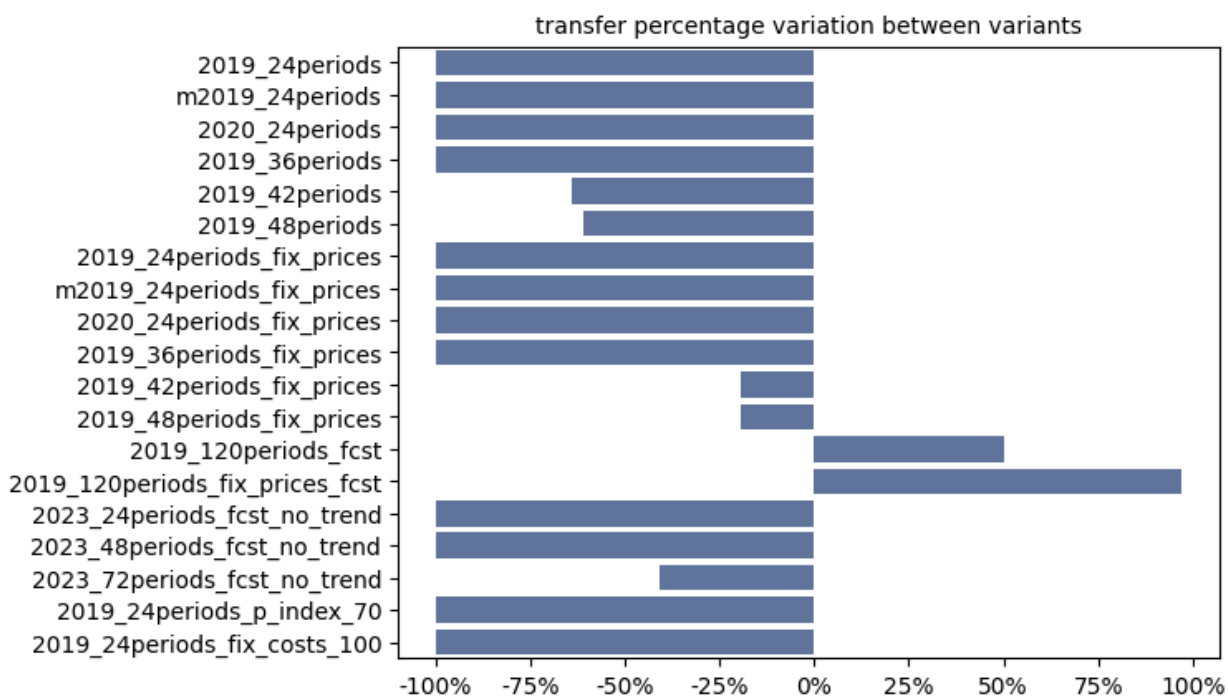


Figura 9: Cambio de transferencias entre variantes por instancia. Elaboración propia

Como se describe en la Figura 9, podemos ver que la mayoría de las variantes muestran una disminución en las transferencias que oscila entre el 25% y el 100%. En los últimos casos en los que no se realizan transferencias, esto debe alinearse con la ausencia de ventas de la Etapa 4 para cumplir con la restricción de sostenibilidad. En correlación con el análisis de ventas, los únicos dos casos que muestran un aumento en las transferencias son las variantes de 120 períodos más largos, desde un aumento del 50 % hasta la duplicación del número de transferencias.

En la Figura 10 exploramos la relación entre la variación porcentual de las transferencias y el número de períodos. Podemos establecer que más períodos se correlacionan con más transferencias. El coeficiente de correlación de Pearson entre ambas variables es 0,9263. Como se mencionó anteriormente, la instancia atípica de 120 períodos “2019\_120periods\_fix\_prices\_fcst” que propone un aumento de transferencia del 97 % desde el punto de referencia está motivada por precios de venta fijos más altos, proponiendo incluso más transferencias que la variante no fija que propone un aumento del 50 %.

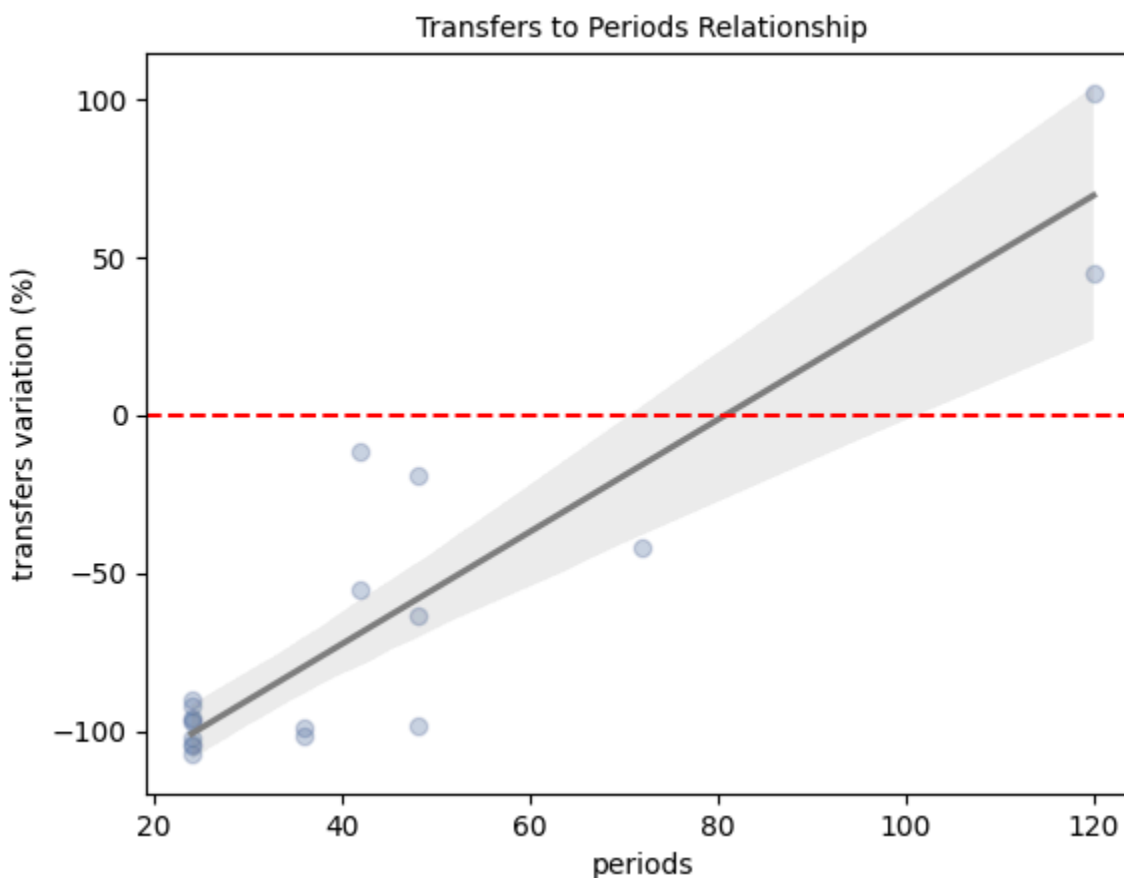


Figura 10: Variación de transferencia en diferente duración de instancia. Jitter agregado en el eje vertical para mejorar la visualización.

Empezamos a ver un patrón claro y uno de los hallazgos clave. Las transferencias y las ventas están estrictamente correlacionadas y ambas se ven afectadas por la longitud de la variante.

En la siguiente sección profundizaremos en una instancia de cada grupo para comprender mejor la lógica detrás de las soluciones propuestas. Un grupo son casos de duración de período más corto en los que el modelo libre no aumentó el stock reproductivo (17 de 19) y uno de los otros dos casos en los que esto sí ocurre.

## Análisis de instancias específicas.

Instancia m2019\_24análisis de periodos:



En esta sección revisaremos una instancia de duración de 24 períodos que comienza a mediados de 2019. La idea es visualizar cómo se resolvió cada variante y detectar diferencias clave. En particular, estamos seleccionando uno del conjunto de casos de período más corto (17 de 19) donde la variante gratuita realiza menos transferencias que la versión básica.

La Figura 11 compara la variante gratuita anterior con la variante básica a continuación. La altura de los diagramas de barras representa el stock mantenido por período, dividido horizontalmente en tres bloques, uno por clase. El color oscuro representa la edad del stock. Este gráfico nos da una perspectiva de cómo se toman las decisiones sobre acciones período tras período para cada clase.



Figura 11: Stock por período, clase y antigüedad por variante, por ejemplo “m2019\_24periods”.

Esta instancia muestra dos aspectos interesantes que vale la pena mencionar. El primero es que la variante básica termina con acciones de Clase 2 sin vender, lo que supone una pérdida de ingresos potenciales. Esto puede explicarse por las restricciones en la composición de las ventas de recién nacidos que impone la variante básica.

En este caso tenemos dos ventanas de reproducción en el período 2 y 14. Todos los recién nacidos generados en el segundo período de reproducción se venden a Nivel 1 en la variante gratuita ya que no hay tiempo suficiente para llegar a ninguna otra etapa de venta, independientemente del beneficio que pueda generar cada etapa. La variante básica solo puede vender el 30% de los recién nacidos en la Etapa 1, terminando con 155 unidades de

acciones de Clase 2 sin vender. Esto genera una pérdida de ganancias para la variante base en comparación con la otra variante.

El segundo aspecto relevante que destaca es la variante base que vendió 88,58 unidades de stock reproductivo Clase 3 en el segundo periodo. ¿Por qué no esperar hasta la segunda ventana de reproducción habilitada en el período 14 para realizar esas ventas y generar más ganado recién nacido?

Podemos realizar lo siguiente Análisis marginal para aumentar una unidad de Clase 3 entre los períodos 3 a 14 para alcanzar la ventana de reproducción:

- $C1n\_m$  Costo de mantenimiento de recién nacido clase 1 entre los períodos 14 al 20 para las edades de 0 a 6 años.
- $C2n\_m$  Costo mantenimiento recién nacido clase 2 entre periodos 20 al 24 (stock no vendido)
- $C3\_m$  Costo de mantenimiento para la Clase 3 entre los períodos 13 al 20.
- $C1n\_p1$  Precio de venta para recién nacidos Clase 1 en Etapa 1.
- $C2n\_p1$  Precio de venta para recién nacidos Clase 2 en Etapa 1.
- $P\_ind$  índice de embarazo al 86%
- El 50% nacen mujeres, el 50% hombres.

$$Maintenance\_costs = C1n\_m \times 50\% \times P_{ind} + C2n\_m \times 50\% \times P_{ind} + C3\_m$$

$$Selling\_income = C1n\_p1 \times 50\% \times P_{ind} + C2n\_p1 \times 50\% \times P_{ind} \times 30\%$$

$$Selling\_income < Maintenance\_costs$$

El costo de mantener el ganado recién nacido potencialmente generado y los mayores costos de mantenimiento de Clase 3 hasta el período 14 es mayor que el valor de venta de los recién nacidos en la Etapa 1, para un 30% de Clase 2 y un 100% de Clase 1. En conclusión, es mejor no criar ganado en absoluto. si a la variante sólo se le permite vender el 30% del ganado femenino, ya que los costes de mantenimiento son superiores a los ingresos obtenidos.

En conclusión, se encuentran dos fuentes de aumento de ingresos que le dan a la variante gratuita medios para alcanzar un aumento de ingresos relativos del 22,9%. Una de ellas es la mayor flexibilidad con respecto a cómo asignar las ventas de recién nacidos en diferentes etapas de venta. El segundo factor es la flexibilidad en la gestión de transferencias y la sostenibilidad del negocio, representada en el mantenimiento del stock reproductivo en el tiempo y al mismo tiempo se optimizan los ingresos.

Podríamos hacer que las restricciones heurísticas sean más inteligentes para evitar decisiones como retener existencias durante una etapa de venta que no existe dentro del período del experimento para cumplir con una de las restricciones heurísticas. Esto no es necesario ya que se abordará en el análisis de instancias más largas. También es innecesario ya que mejorar la variante básica no es un objetivo del proyecto sino más bien un paso hacia la validación y mejora del modelo principal de variante gratuita. En resumen, la solución final de la variante gratuita se describe a continuación:

- cero transferencias
- Ventas etapa 1 aumento del 13,17%
- Ventas de la etapa 2: disminución del 53,37%
- Etapa 3 misma cantidad (46 unidades)
- Ventas cero de la etapa 4 (88,58 unidades en la variante básica)
- nacimientos aumento del 9,4%
- aumento de ingresos 22,9%

Instancia Análisis 2019\_120periods\_fcst:

Esta instancia de mayor duración se compone de 120 períodos, 10 de los cuales son períodos de reproducción. A diferencia del otro grupo de 17 instancias de períodos más cortos, éste representa uno de los dos casos en los que las transferencias aumentan. Igual que antes, exploramos en la Figura 12 el stock por período, para cada clase.



Figura 12: Existencias por período, clase y antigüedad por variante, por ejemplo “2019\_120periods\_fcst”.

Ambas variantes presentan un aumento del stock de Clase 3 con el tiempo. Once períodos anteriores a que la instancia finalice en el período 109, ambas variantes venden acciones Clase 3, retrocediendo a los niveles de existencias iniciales para cumplir con la restricción de sostenibilidad. La solución variante gratuita obtuvo un aumento de ingresos del 41,1% y propone un aumento de transferencias del 50,42%.

Una distinción principal está en la fase en la que se asignan las transferencias. La variante de referencia aumenta constantemente el stock reproductivo mediante el seguimiento con el reglas heurísticas, asignando cada año el 40% del ganado recién nacido a la Clase 3. La variante gratuita supera esta proporción al aumentar rápidamente la asignación de Clase 3 en detrimento de las ventas anteriores de Clase 2.

La variante libre continúa transfiriendo acciones de la Clase 2 a la Clase 3 hasta el período 66. Clase 3 Las cantidades permanecen constantes hasta el período 109, momento en el que se vende el 61% del stock total. Podríamos preguntarnos por qué es óptimo vender ganado de Clase 3 en el período 109 si hay una última ventana de reproducción más en el período 115. La respuesta está en el hecho de que el ganado recién nacido generado para esa ventana de reproducción alcanza la edad de 5 años en el último período. Falta un período para alcanzar la Etapa 1 de ventas, que ocurre entre las edades de seis y ocho años. Esto hace que la reproducción sea mayor y no óptima en la última ventana. Ambas soluciones proponen cierta

cantidad, ya que se requiere una cierta cantidad de Clase 3 para igualar las existencias iniciales de Clase 3 para cumplir con las restricciones de sostenibilidad. La solución base realiza más cruza en esta última ventana provocada por un modelo más restringido en cuanto a transferencias.

En la Figura 13 reportamos las ventas por período para ambas variantes. La altura de los diagramas de barras representa la cantidad de stock vendido por período, dividido horizontalmente en tres bloques, uno por clase. La oscuridad representa la edad.

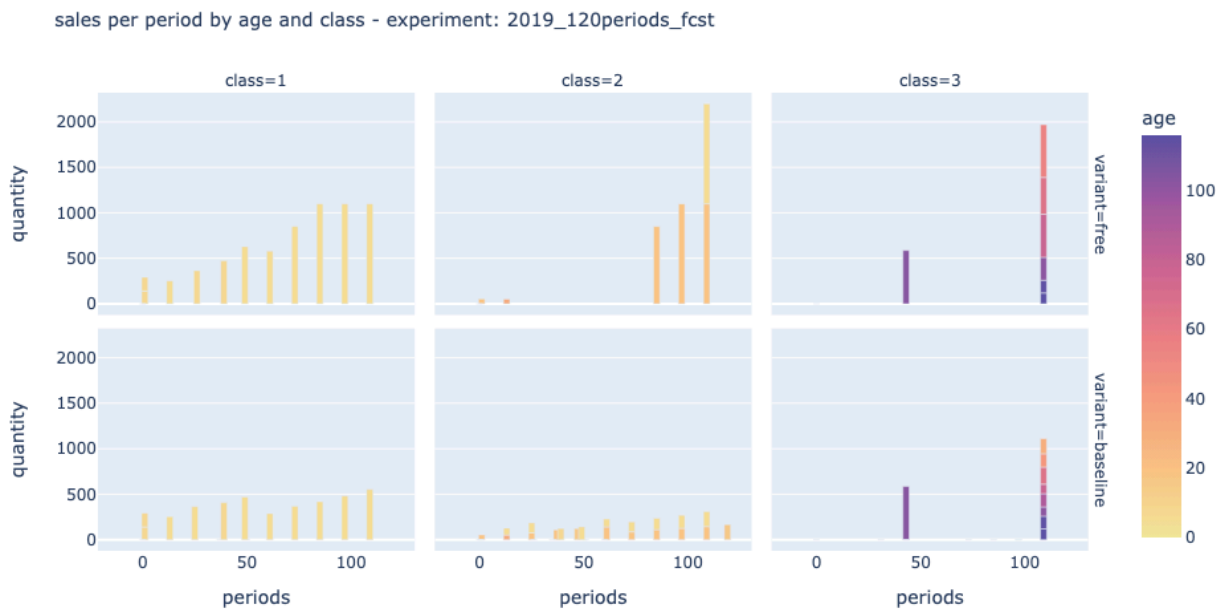


Figura 13: Ventas por período, clase y edad por variante para el experimento "2019\_120periods\_fcst".

Las ventas de variantes libres de Clase 2 se diferencian hacia transferencias anteriores, proponiendo no realizar ventas entre el período 13 y 85; esta elección acelera el ritmo al que aumenta el stock reproductivo. Durante los últimos períodos, las ventas de la variante gratuita superan y generan una diferencia de ingresos significativa en comparación con la variante básica.

Las cantidades de ventas de Clase 1 aumentan año tras año para ambas variantes. Una mayor cantidad de material reproductivo mantenido también conduce a un mayor número de recién nacidos varones, lo que posteriormente se traduce en más ventas.

---

En resumen, contrastando el análisis de instancias de menor duración, se observa un cambio en la estrategia de solución propuesta. Las instancias más largas están dando suficiente tiempo para redimir la inversión realizada en ganado reproductivo y capturar ingresos a largo plazo realizando mayores ventas posteriores. Este es un ejemplo de la capacidad del modelo para adaptarse eficazmente en respuesta a diversos entornos y variables de entrada, mostrando su flexibilidad para responder a diversos escenarios propuestos.

El punto de inflexión para realizar este cambio podría generarse por una combinación de factores. El aumento de los precios de venta, la reducción de costos, una mayor tasa de embarazo o una combinación de todos ellos con otros insumos pueden reducir o aumentar directamente el número de períodos para alcanzar este cambio de estrategia. Vale la pena mencionar que la acumulación de existencias podría verse potencialmente restringida por la infraestructura o la disponibilidad de mano de obra. Este y otros aspectos serán mencionados en el apartado de conclusiones.

La solución de resolución gratuita propone:

- transferencias aumento del 50,42%
- Ventas de la etapa 1: aumento del 57,56%
- Ventas de la etapa 2: aumento del 173,62%
- Etapa 3 misma cantidad vendida
- Ventas etapa 4 aumento del 50,42%
- nacimientos aumento del 78,19%
- ingresos aumento del 41,1%

## Análisis de duración de variantes

En esta sección pretendemos explorar la relación entre duración de instancia y transferencias, buscando identificar la ocurrencia de este cambio de estrategia que se da entre instancias de corto y largo plazo. Para realizar este análisis, volveremos a ejecutar la misma instancia varias veces, agregando a cada ejecución 10 períodos adicionales, aumentando el horizonte temporal y explorando cómo se configuran las soluciones.

Seleccionamos el período de inicio en enero de 2019. Para eliminar el impacto de la fluctuación de precios a lo largo del tiempo, también ejecutaremos un conjunto de instancias con precios fijos. El espacio de búsqueda generado se define de 24 a 120 períodos con pasos de 10 períodos, totalizando 18 instancias, nueve con precios fijos y nueve con precios variables.

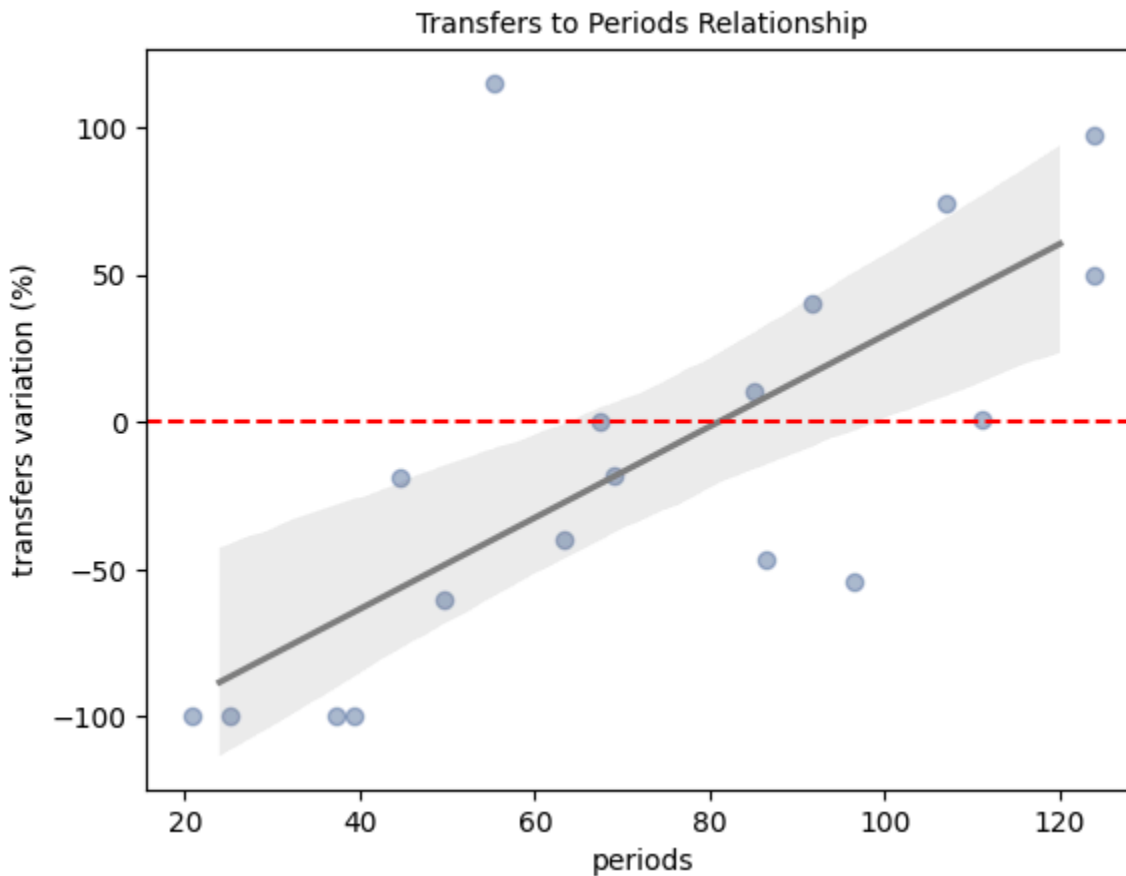


Figura 14: Variación de transferencia entre la variante gratuita y la de referencia por número de períodos de instancia. Jitter agregado en el eje X para evitar la superposición entre puntos.

En la Figura 14 hay una tendencia notable donde las instancias más largas se correlacionan con más transferencias, con un coeficiente de correlación de 0,72. Con base en configuraciones e insumos dados, parece que el cambio de estrategia tiende a ocurrir alrededor de los 80 períodos.

La correlación de Pearson dentro de grupos de precios fijos y variables durante cada período es 0,9721 para casos de precios fijos y 0,4846 para casos de precios variables. Esto indica que nuestro razonamiento mantiene una correlación fuerte y directa y, al mismo tiempo, es representativo de casos más simples. Sin embargo, al introducir la complejidad de escenarios del mundo real con precios, costos o cualquier otro entorno cambiantes, la influencia de la duración de la instancia disminuye en una relevancia más amplia de un panorama más amplio con respecto a los insumos.

Concluimos que incluso cuando la duración de la instancia es un parámetro clave, no es el único parámetro relevante para cambiar la solución hacia el aumento de los niveles reproductivos más tempranos. Esto también respalda la idea de que los enfoques de investigación operativa, como soluciones analíticas, poseen la ventaja de consumir grandes cantidades de datos. Las complejidades de las soluciones propuestas pueden escapar del alcance del análisis realizado por humanos que se puede lograr mediante una exploración única o múltiple.



## Iconclusión Vs

Nosotros CRealizó un análisis de referencia para un conjunto de 19 instancias, explorando cómo las soluciones propuestas resuelven una red diversa de configuraciones. Luego, realizamos un análisis profundo de dos casos que representan dos tipos diferentes de soluciones. Se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- El impacto positivo obtenido está entre el 2% y el 40% con un valor medio del 22,4%, excluyendo un caso atípico de ingresos significativamente mayores.
- Las etapas de venta priorizadas entre variantes exhiben una alta variabilidad basada en entradas que muestran flexibilidad del modelo ante entradas dadas.
- A medida que aumenta el número de períodos, se puede lograr un mayor impacto en los ingresos.
- Los niveles de referencia de asignación de stock reproductivo se superan sólo en casos más prolongados, ya que se requiere tiempo para que la inversión produzca beneficios.
- La duración de la instancia juega un papel crucial para que la solución óptima supere los niveles de referencia; sin embargo, otros datos relevantes del modelo, como las fluctuaciones de precios, influyen directamente en el momento en que se produce este cambio.

La evidencia indica que la solución analítica basada en técnicas de optimización puede abstraer con éxito las principales dimensiones del problema empresarial presentado. Las soluciones obtenidas muestran una alta adaptabilidad a las variables de entrada cambiantes, lo que demuestra versatilidad al tiempo que utilizan estrategias explicables que pueden usarse para proporcionar información al tomador de decisiones para mejorar su operación. Complementadas con herramientas de visualización de datos, las soluciones pueden ser interpretables, mejorando la comprensión y explicabilidad de los resultados.

A partir de estos hallazgos, gastar recursos y tiempo para refinar el modelo y construir una integración como una solución prescriptiva surge como una oportunidad de negocio prometedora y satisface el objetivo de esta tesis.

## Dimensiones comerciales valiosas para las próximas iteraciones

---

Debido a limitaciones de tiempo, algunas dimensiones o advertencias valiosas que vale la pena considerar se dejaron para iteraciones futuras.

**Mezcla de alimento para pasto** utilizado para alimentar al ganado se produce localmente. Cuando se agota, se compra a otros productores. La subcontratación es El general más caro y el precio puede aumentar más si la oferta del mercado es baja debido a las escasas lluvias o al granizo que cae durante la temporada de cosecha anterior. Esto puede afectar los costos de reproducción y generalmente está asociado con la venta en etapas más tempranas del ciclo de vida (Etapa 1) en lugar de en etapas posteriores. Optar por reducir la producción y utilizar únicamente piensos cultivados internamente reduce la incertidumbre sobre los precios, pero también podría afectar negativamente a los ingresos. Incluir el consumo de pasto, la disponibilidad y los precios de subcontratación proporcionaría una dinámica de costos más realista para la operación de mejoramiento.

DDecisiones y restricciones relacionadas con cuántos **toros** son necesarios y no se está modelando su costo para satisfacer la reproducción de toda la clase de hembras. Consideramos que modelar alcistas no compensará el aumento en complejidad por agregar una cuarta clase al modelo o agregar más restricciones para describirlo. Esto podría cambiar si queremos considerar múltiples especies donde esta variable podría ganar relevancia.

**Costos relacionados con infraestructura y mano de obra.** adaptándose según el stock que se mantiene en los diferentes grupos de edad. Los datos relacionados con cómo aumentan los costos y la mano de obra por tamaño de operación no estaban disponibles, pero sería relevante recopilarlos en investigaciones futuras.

**Política de gobiernos locales y extranjeros** está cambiando constantemente, afectando la forma en que los agentes deciden y proyectan los ingresos esperados del negocio, tanto a corto como a largo plazo. Los ejemplos de políticas gubernamentales implementadas en los últimos diez años van desde impuestos variables, que imponen una cuota de venta, hasta una etapa de venta específica. Dependiendo de la orientación política del gobierno gobernante, se esperan escenarios drásticamente diferentes dada la polarización en ambos partidos relacionada con las políticas comerciales. Estos pueden ser un factor principal y uno de los factores centrales en la toma de decisiones. Podría ser valioso considerar la incorporación de estas externalidades en un marco que describa cómo diferentes escenarios podrían impactar teóricamente la operación.

Diseño **simulaciones** La representación de escenarios teóricos puede proporcionar información valiosa al validar estrategias o medir el impacto en posibles resultados. “La experimentación es posible con un modelo, mientras que a menudo no es posible o deseable

experimentar con el objeto que se está modelando” (Williams, 2013). Por ejemplo, se podrían considerar escenarios probabilísticos tales como precios de exportación esperados bajos versus altos, combinados con una posible política de restricción de cuotas de exportación durante una temporada particular o un aumento en los costos para una categoría específica, para dar algunos ejemplos. Esto abre una ventana de oportunidad que no se está aprovechando en esta tesis.

**Incorporación de una tasa de descuento monetario** representaría que los ingresos presentes son más valiosos que los ingresos diferidos. Actualmente estamos calculando la suma de la función objetivo período a período, dando el mismo valor económico al dinero ganado en los períodos anteriores que al obtenido en los períodos finales. Agregar una tasa de descuento monetario podría refinar el modelo para aumentar el valor relativo de las ganancias anteriores mediante una tasa de descuento fija o variable por período. De esta manera, se da forma al modelo en un entorno empresarial más realista.

Pudimos incluir un **análisis de sensibilidad** incorporando la metodología propuesta por Hazell (1971) en su trabajo “A Linear Alternative to Quadratic and Semivariance Programming for Farm Planning under Uncertainty”.

## Próximos pasos en la implementación empresarial

En esta sección analizamos los pasos propuestos y las consideraciones sobre la integración de la solución en la empresa de manera que pueda generar un impacto positivo y duradero.

Para garantizar una entrega adecuada de nuestra herramienta de optimización y transformarla en una solución prescriptiva real, es fundamental diseñar un plan de integración. Lo ideal es que este plan se realice de manera conjunta entre el equipo técnico y los principales tomadores de decisiones de la empresa. Este enfoque ayuda a evitar implementaciones unilaterales y enfatiza los esfuerzos de colaboración para generar confianza y visibilidad desde cero. Es clave que el personal técnico comparta tanto el valor potencial como la oportunidad, así como las suposiciones realizadas, las advertencias y las limitaciones actuales para alinear las expectativas y los esfuerzos con los objetivos.

Considerando que la primera cuestión que planteó la empresa se refería a encontrar la categoría de venta óptima entre las etapas uno a cuatro en un período de tiempo determinado. Mientras que el segundo es la necesidad de encontrar un equilibrio óptimo entre el aumento del stock reproductivo y la priorización de ventas alineadas con diferentes escenarios potenciales.

---

Podemos dividir el flujo de trabajo en dos partes como *optimización de ventas* y *optimización de la reproducción*.

### Optimización de ventas

El primer objetivo sería resolver la cuestión más simple de decidir cuál es la categoría de venta óptima a la que apuntar, dado un conjunto de precios, costos y existencias presentes esperados en el futuro. Considerando en un primer momento una ventana de tiempo corta de un año. La atención no se centra en cómo optimizar la selección, sino en las ventas en un entorno de altos precios y fluctuaciones de costos, que dificultan apuntar a la categoría correcta durante un ciclo de selección.

Una prueba rápida de valor puede ser una buena idea, mostrando cómo la solución optimiza las ventas durante un período determinado y comparándolas con las realizadas por los propietarios de la empresa durante el mismo período. Podríamos explorar si coinciden o no y validar cómo la optimización captura la categoría o categorías de ingresos más altos para cada clase por período. Simplificando las cosas, esto puede mostrar cómo podemos proporcionar una respuesta basada en datos a un problema complejo.

Luego, podríamos repetir el mismo experimento pero con los precios pronosticados utilizando un modelo simple, similar al aplicado durante nuestro benchmark anterior, repetir la comparación agregando los matices sobre cómo el error de pronóstico impacta los ingresos obtenidos. Enfatizar que los insumos del modelo son tan importantes como el modelo mismo e invertir tiempo en mejorarlos es parte de los esfuerzos futuros.

### Optimización de la reproducción

Este análisis podría centrarse en un horizonte temporal más amplio que el anterior. El objetivo final es brindar información orientada a datos para planificar una estrategia de mejoramiento a más largo plazo. Una forma de hacerlo es simulando diferentes escenarios, calculando los ingresos potenciales dadas diferentes estrategias cuando se aplican a diferentes entornos económicos.

Resolver cómo planificar la operación entre ciclos económicos donde cambian los precios de las materias primas y los costos de fabricación es complejo. Combinar un conjunto de escenarios esperados predefinidos y estudiar cómo se optimiza la solución para esos escenarios puede proporcionar información valiosa.

El primer paso sería diseñar un grupo de escenarios posibles como entradas del modelo. Esto podría oscilar entre pesimista y optimista o de diseño. Complementar también con posibles políticas gubernamentales que podrían tener un impacto positivo o negativo en diferentes dimensiones empresariales. Luego, aplique la optimización a las diferentes configuraciones y capture información e ingresos teóricos en cada escenario. Decidir optar por una estrategia específica podría funcionar muy bien en los Escenarios A y B, pero muy mal en el Escenario C. ¿Qué tan posible es que ocurra el Escenario C dado nuestro conocimiento actual? Un debate de este tipo podría resultar muy valioso.

También podría ser interesante realizar análisis de sensibilidad, como explorar en qué medida ciertas variables impactan las estrategias óptimas presentadas. Podríamos considerar, por ejemplo, ¿cuánto aumento de costos podemos tolerar hasta que la solución tome una forma específica o se dirija a otra etapa de venta? ¿Qué tan bajo puede ser el índice de mejoramiento manteniendo la operación rentable en este entorno particular?

La simulación de diferentes escenarios probabilísticos podría llevar a calcular los ingresos esperados para diferentes estrategias. La elección de la estrategia óptima evoluciona hacia una combinación de conocimiento empresarial, expectativas económicas y la solución del solucionador en sí.

### Otras Consideraciones

Durante la introducción de la solución, una buena práctica sería redactar un documento que describa de manera muy sucinta y no técnica los aspectos principales de la solución que podríamos utilizar como paso inicial para presentar el modelo a la dirección de la empresa.

Primero, se describen los requisitos de entrada de datos del modelo, los supuestos comerciales y del modelo más importantes, las principales transformaciones y limitaciones de los datos. Luego, se recomienda alinear una lista de futuras mejoras y validaciones que se pueden realizar. Este documento sería una guía fácil de usar que permitiría al usuario no técnico desarrollar su propiedad y aumentar la adopción.

Las mejoras futuras siempre deben considerar el valor agregado frente a la complejidad y el esfuerzo requerido para implementar. Las primeras características a mejorar deben ser las “frutas maduras”, que son fáciles de construir y muy valiosas. Después de ese primer paso, podríamos decidir si el mejor camino es apostar por las grandes apuestas que tienen un alto valor y una gran complejidad, o resolver pequeñas características que son menos complejas y al mismo tiempo menos valiosas.

Podría ser beneficioso para encontrar maneras de utilizar rápidamente y validar las sugerencias del modelo y aplicarlas en un problema empresarial futuro cercano. En particular, es crucial evitar centrarse únicamente en la mejora del modelo y no trabajar en su utilización y adopción.

## V. Referencias bibliográficas

1. Ras, C. H., Marra, R. M. A., & Tettamanti, M. F. A. (2020). Cambios en el uso del suelo entre agricultura y ganadería en un establecimiento típico en General Pinto, Pradera Pampeana, Argentina, analizado con programación lineal. *Agronomía & Ambiente*, 40(2), 151-163.
2. Aliano Filho, A., Melo, T. y Vaz Pato, M. (2020). Planificación táctica de operaciones de cosecha y transporte de caña de azúcar. Serie de publicaciones sobre logística de la Facultad de Economía de htw saar (Informes técnicos sobre logística de la Escuela de Negocios del Sarre n° 18).
3. Frank, R. G. (2021). ¿Cuántas personas puede alimentar la región pampeana? *Anales de la ANAV*, LXXII, 72-83. ISSN: 0327-8093.
4. Campanella, S. R., Corsano, G. y Montagna, J. M. (2018). Un marco de modelado para el diseño óptimo de la cadena de suministro forestal considerando la reutilización de residuos. *Producción y Consumo Sostenible*. Elsevier BV ISSN: 2352-5509.
5. Gradowczyk, M. H., Jacovkis, P. M., Freisztav, A. M., Roussel, J.-M. y Tabak, EG (1990). Optimización de recursos hídricos—simulación en Argentina. *Revista europea de investigación operativa*, 49(2), 247-253.
6. Williams, HP (2013). *Construcción de modelos en programación matemática*. John Wiley e hijos.
7. Paul Goodwin, 2010. "El enfoque de Holt-Winters para el suavizado exponencial: 50 años y va fuerte", *Foresight: The International Journal of Applied Forecasting*, Instituto Internacional de Meteorólogos, número 19, páginas 30-33, otoño.
8. Hazell, P.. 1971. Una alternativa lineal a la programación cuadrática y de semivarianza para Planificación agrícola bajo incertidumbre. *Revista Estadounidense de Economía Agrícola*. 53: 53-62.