DEPARTAMENTO DE COMPUTACION

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales - UBA

Trabajo Práctico N°2

19 de Mayo de 2025 Introducción a la Investigación Operativa y Optimización

Grupo 4

Integrante	LU	Correo electrónico
Suarez Ines	890/22	`ine.suarez22@gmail.com`
Navarro Solana	906/22	`solanan3@gmail.com`
Wittmund Montero, Lourdes	1103/22	`lourdesmonterochiara@gmail.com`

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

Universidad de Buenos Aires

Ciudad Universitaria - (Pabellón I/Planta Baja)

Intendente Güiraldes 2610 - C1428EGA

Ciudad Autónoma de Buenos Aires - Rep. Argentina

Tel/Fax: (++54 +11) 4576-3300

http://www.exactas.uba.ar

1. Introducción

En este trabajo práctico se aborda un problema de distribución de productos a clientes, centrado en la optimización de rutas y la reducción de costos. La situación planteada parte del modelo actual de distribución de una empresa, en el cual un camión realiza entregas puerta a puerta a todos los clientes. Con el objetivo de disminuir los costos operativos, se propone una nueva metodología que combina el uso del camión con repartidores a pie o en bicicleta, que cubren distancias cortas desde ciertos puntos de parada del camión.

El trabajo consiste en modelar esta problemática mediante técnicas de Programación Lineal Entera (PLE). Se desarrolla un modelo que represente tanto la metodología actual como la propuesta, teniendo en cuenta distintas restricciones, tales como la capacidad de los repartidores, la presencia de productos que requieren refrigeración y clientes que deben necesariamente ser atendidos por el camión.

La implementación de los modelos se lleva a cabo utilizando el software CPLEX, y se realizan diversas instancias experimentales que permiten comparar los costos totales de ambas metodologías. Asimismo, se evalúan los impactos de incorporar restricciones adicionales deseables y se analizan los tiempos de cómputo involucrados.

El objetivo final es determinar en qué medida la metodología híbrida de distribución resulta beneficiosa en términos económicos, y bajo qué condiciones estas mejoras pueden sostenerse operativamente.

2. Modelos

2.1. Metodología actual

El recorrido del camión se modela como una variante del Problema del Viajante de Comercio (TSP) asimétrico, utilizando la formulación propuesta por Miller, Tucker y Zemlin (1960) para evitar subtours. Es decir, esta formulación garantiza que el camión recorra todos los nodos en un único tour, sin ciclos intermedios. Las variables u_i representan el orden relativo de los nodos en el recorrido, y se usan únicamente para cortar subtours.

Conjuntos:

- $N = \{1, 2, \ldots, n\}$: conjunto de clientes (nodos)

Parámetros:

- c_{ij}: costo de recorrer desde el cliente i al cliente j
- n: número de clientes

Variables de decisión:

- $x_{ij} \in \{0, 1\}$: 1 si el camión va directamente del cliente i al cliente j, 0 en caso contrario
- $u_i \in \mathbb{Z}$: orden de visita del cliente i (para evitar subtours)

Función objetivo:

$$\min \sum_{i \in N} \sum_{\substack{j \in N \\ j \neq i}} c_{ij} \cdot x_{ij} \tag{1}$$

Restricciones:

$$\sum_{\substack{j \in N \\ j \neq i}} x_{ij} = 1 \qquad \forall i \in N \tag{2}$$

$$\sum_{\substack{i \in N \\ i \neq j}} x_{ij} = 1 \qquad \forall j \in N \tag{3}$$

$$u_1 = 0 \tag{4}$$

$$1 \leq u_i \leq n - 1 \qquad \forall i \in N \setminus \{1\} \tag{5}$$

$$u_i - u_j + (n-1)x_{ij} \leq n - 2 \qquad \forall i, j \in N \setminus \{1\},\ i \neq j \tag{6}$$

Dominios de las variables:

$$x_{ij} \in \{0,1\} \qquad \forall i,j \in N,\ i \neq j$$
$$u_i \in \mathbb{Z} \qquad \forall i \in N$$

Explicación de la función objetivo y las restricciones:

(1) La función objetivo minimiza el costo total de traslado del camión. El costo por ir de un cliente i a otro cliente j está dado por c_{ij}, y x_{ij} es una variable binaria que vale 1 si el camión recorre ese tramo.

(2) Esta restricción asegura que desde cada cliente se salga una única vez. Es decir, el camión debe continuar el recorrido desde cada nodo exactamente una vez.

(3) Esta restricción asegura que a cada cliente se llegue una única vez. Es decir, el camión debe entrar exactamente una vez a cada nodo.

Usando **(2)** y **(3)** nos aseguramos que se pase por cada cliente una sola vez.

(4) Fijamos que el nodo 1 es el punto de inicio del recorrido del camión, asignándole el valor 0 en las variables auxiliares u_i.

(5) Las variables auxiliares u_i toman valores entre 1 y $n-1$ para los nodos distintos del nodo 1. Estas variables representan el orden de visita del camión y ayudan a evitar subciclos.

(6) Las restricciones de tipo MTZ (Miller–Tucker–Zemlin) previenen la formación de subciclos en el recorrido. Combinadas con las variables u_i, garantizan que el tour sea único y pase por todos los nodos exactamente una vez.

2.2. Nueva metodología

En este modelo extendimos el anterior para reflejar la nueva estrategia, en la cual algunas entregas pueden realizarse a pie o en bicicleta a partir de ciertas paradas que hace el camión. Esto nos llevó a modificar la estructura del modelo original.

Una de las principales incorporaciones fue la introducción de un nuevo conjunto de variables binarias, llamadas y_{ij}. Cada variable y_{ij} vale uno si un repartidor realiza una entrega desde el cliente i, que es una parada del camión, hacia el cliente j, que no es visitado directamente por el camión. Estas variables permiten modelar de forma explícita las asignaciones de entregas realizadas a pie o en bicicleta, y nos permiten capturar el hecho de que algunos clientes ya no necesitan estar incluidos en el recorrido del camión, siempre y cuando puedan ser atendidos desde una parada cercana.

Para que una entrega a pie o en bicicleta sea válida, se debe cumplir que la distancia entre el cliente i (la parada del camión) y el cliente j (el destino del repartidor) no supere un cierto umbral máximo, llamado $d_{\text{máx}}$. Este parámetro refleja el alcance que puede cubrir un repartidor de manera razonable.

Otro cambio fue agregar las variables binarias p_i que valen uno si el camión para en el cliente i y hace entregas en bicicleta o caminando dese ahí y cero sino. Estas variables nos ayudan a modelar mejor el sistema implementado con el agregado de los repartidores.

Además, tenemos algunos pedidos que exigen refrigeración, por lo tanto, no puede haber más de una entrega de productos refrigerados a pie/bici por un mismo repartidor. Esto restringe más aún las posibles combinaciones que podemos hacer entre paradas y repartidores.

Para poder enfrentar este nuevo problema tuvimos que hacer unas modificaciones específicamente en la parte de la continuidad del modelo MTZ, llevandonos a cambiar el rango de las variables u_i ya que ahora el camión no visita a todos los clientes.

En conjunto, el modelo final busca minimizar el costo total de distribución, compuesto por el costo del recorrido del camión y el costo por cada cliente atendido por un repartidor. Al permitir que algunos clientes sean atendidos a pie o en bicicleta, y otros directamente por el camión, el modelo ofrece una solución más flexible y potencialmente más eficiente que la metodología original.

Conjuntos:

- $N = \{1, 2, \ldots, n\}$: conjunto de clientes (nodos)
- $R \subseteq \{1, \ldots, n\}$: Conjunto de clientes con pedidos refrigerados.

Parámetros:

- c_{ij}: costo de recorrer desde el cliente i al cliente j
- n: número de clientes
- d_{ij}: Distancia entre cliente i y j.
- $d_{\text{máx}}$: Distancia máxima que puede recorrer un repartidor a pie/bici.
- c_r: Costo fijo por pedido entregado por repartidor.

Variables de decisión:

- $x_{ij} \in \{0,1\}$: 1 si el camión va directamente del cliente i al cliente j, 0 en caso contrario
- $y_{ij} \in \{0,1\}$: 1 si el repartidor parte desde el cliente i para entregar a j, 0 si no.
- $p_i \in \{0,1\}$: 1 si el camión para y le salen repartidores desde el cliente i, 0 si no.
- $u_i \in \mathbb{Z}$: orden de visita del cliente i (para evitar subtours).

Modelo con reparto en bicicleta o camión

Función objetivo:

$$\text{mín} \sum_{i\in N} \sum_{\substack{j\in N\\ j\neq i}} c_{ij} \cdot x_{ij} + \sum_{i\in N} \sum_{\substack{j\in N\\ j\neq i}} c_r \cdot y_{ij} \tag{1}$$

Restricciones:

$$\sum_{\substack{i\in N\\ j\neq i}} x_{ij} + \sum_{\substack{i\in N\\ j\neq i}} y_{ij} = 1 \qquad \forall j \in N \tag{2}$$

$$\sum_{\substack{i\in N\\ j\neq i}} x_{ij} = \sum_{\substack{i\in N\\ i\neq i}} x_{ji} \qquad \forall j \in N \tag{3}$$

$$\sum_{\substack{j\in N\\ j\neq i}} y_{ij} \leq n \cdot p_i \qquad \forall i \in N \tag{4}$$

$$\sum_{\substack{j\in N\\ j\neq i}} y_{ij} \geq p_i \qquad \forall i \in N \tag{5}$$

$$\sum_{\substack{j\in N\\ j\neq i}} x_{ji} \geq p_i \qquad \forall i \in N \tag{6}$$

$$\sum_{\substack{j\in R\\ j\neq i}} y_{ij} \leq 1 \qquad \forall i \in N \tag{7}$$

$$y_{ij} \cdot d_{ij} \leq d_{\max} \qquad \forall i, j \in N,\ i \neq j \tag{8}$$

$$u_i - u_j + (n+1)x_{ij} \leq n \qquad \forall i, j \in N \setminus \{1\},\ i \neq j \tag{9}$$

$$u_1 = 0 \tag{10}$$

$$-1 \leq u_i \leq n-1 \qquad \forall i \in N \setminus \{1\} \tag{11}$$

Dominios de las variables:

$$x_{ij}, y_{ij}, p_i \in \{0,1\} \quad \forall j, i \in N, i \neq j$$
$$u_i \in \mathbb{Z} \quad \forall i \in N$$

Explicación de la función objetivo y restricciones:

(1) Primer término: $\sum_{i \neq j} c_{ij} \cdot x_{ij}$ representa el costo total del recorrido del camión. Cada variable x_{ij} indica si el camión se traslada del cliente i al cliente j, y c_{ij} es el costo asociado a ese movimiento. **Segundo término:** $\sum_{i \neq j} cr \cdot y_{ij}$ representa el costo total de utilizar repartidores a pie o en bicicleta. Por cada cliente j atendido por un repartidor que parte desde i, se paga un costo fijo cr, independientemente de la distancia (siempre que sea permitida por las restricciones).

(2) Cada cliente debe ser atendido exactamente una vez, ya sea por el camión o por un repartidor a pie/bici.

(3) Conservación del flujo del camión: el número de arcos que entran y salen de cada cliente debe ser igual, lo que garantiza un recorrido continuo y sin desconexiones.

(4) Un cliente i es parada si algún repartidor sale desde ahí.

(5) Si no sale ningún repartidor del cliente i, este no puede ser parada.

(6) Si no le llega el camión al cliente i, este no puede ser parada.

(7) Cada repartidor solo puede entregar hasta 1 pedido con refrigeración. Desde cada nodo i puede haber 1 o 0 entregas refrigeradas del repartidor.

(8) Un cliente j solo puede ser atendido desde un nodo i por un repartidor si la distancia entre ellos es menor o igual a $d_{\max}$. En caso contrario, se fuerza $y_{ij} = 0$.

(9) Restricciones de tipo MTZ para evitar subciclos en el recorrido del camión.

(10) Se fija el nodo 1 como punto de inicio del recorrido del camión, asignándole $u_1 = 0$.

(11) Se establece el dominio de las variables auxiliares u_i para los nodos distintos del primero, con el objetivo de que representen posiciones en el recorrido del camión y si no pertenecen al recorrido del camión tomen el valor -1.

2.3. Modelo con reparto en bicicleta o camión con restricciones deseables

Este modelo es el mismo que el anterior solo que se le agregan dos restricciones más que son deseables. Las restricciones son:

- Queremos asegurar que cada repartidor a pie/bici contratado realice al menos 4 entregas.
- Que haya determinados clientes que deban ser visitados por el camión.

El modelo es exactamente el mismo que el anterior a excepción de estas nuevas restricciones.
Conjuntos:

- $N = \{1, 2, \ldots, n\}$: conjunto de clientes (nodos)
- $R \subseteq \{1, \ldots, n\}$: Conjunto de clientes con pedidos refrigerados.
- $E \subseteq \{1, \ldots, n\}$: Conjunto de clientes con pedidos exclusivos.

Parámetros:

- c_{ij}: costo de recorrer desde el cliente i al cliente j
- n: número de clientes
- d_{ij}: Distancia entre cliente i y j.
- $d_{\text{máx}}$: Distancia máxima que puede recorrer un repartidor a pie/bici.
- c_r: Costo fijo por pedido entregado por repartidor.

Variables de decisión:

- $x_{ij} \in \{0, 1\}$: 1 si el camión va directamente del cliente i al cliente j, 0 en caso contrario
- $y_{ij} \in \{0, 1\}$: 1 si el repartidor parte desde el cliente i para entregar a j, 0 si no.
- $p_i \in \{0, 1\}$: 1 si el camión para y le salen repartidores desde el cliente i, 0 si no.
- $u_i \in \mathbb{Z}$: orden de visita del cliente i (para evitar subtours)

Modelo con restricciones adicionales

Función objetivo:

$$\min \sum_{i\in N}\sum_{\substack{j\in N\\ j\neq i}} c_{ij}\cdot x_{ij} + \sum_{i\in N}\sum_{\substack{j\in N\\ j\neq i}} c_r\cdot y_{ij} \tag{1}$$

Restricciones:

$$\sum_{\substack{i\in N\\ j\neq i}} x_{ij} + \sum_{\substack{i\in N\\ j\neq i}} y_{ij} = 1 \qquad \forall j\in N \tag{2}$$

$$\sum_{\substack{i\in N\\ j\neq i}} x_{ij} = \sum_{\substack{i\in N\\ i\neq i}} x_{ji} \qquad \forall j\in N \tag{3}$$

$$\sum_{\substack{j\in N\\ j\neq i}} y_{ij} \leq n\cdot p_i \qquad \forall i\in N \tag{4}$$

$$\sum_{\substack{j\in N\\ j\neq i}} y_{ij} \geq p_i \qquad \forall i\in N \tag{5}$$

$$\sum_{\substack{j\in N\\ j\neq i}} x_{ji} \geq p_i \qquad \forall i\in N \tag{6}$$

$$\sum_{\substack{j\in R\\ j\neq i}} y_{ij} \leq 1 \qquad \forall i\in N \tag{7}$$

$$y_{ij}\cdot d_{ij} \leq d_{\max} \qquad \forall i,j\in N,\ i\neq j \tag{8}$$

$$u_i - u_j + (n+1)x_{ij} \leq n \qquad \forall i,j\in N\setminus\{1\},\ i\neq j \tag{9}$$

$$u_1 = 0 \tag{10}$$

$$-1 \leq u_i \leq n-1 \qquad \forall i\in N\setminus\{1\} \tag{11}$$

$$\sum_{\substack{i\in N\\ j\neq i}} y_{ji} \geq 4\cdot p_j \qquad \forall j\in N \tag{12}$$

$$\sum_{i\neq j} x_{i,j} = 1 \qquad \forall i\in E \tag{13}$$

$$\tag{2}$$

Dominios de las variables:

$$x_{ij}, y_{ij}, p_i \in \{0,1\} \quad \forall j,i\in N, i\neq j$$
$$u_i\in\mathbb{Z} \quad \forall i\in N$$

Explicación de las restricciones:

Como la función objetivo y las primeras **(11)** restricciones no cambian respecto al modelo anterior, solo vamos a explicar las nuevas restricciones.

(12) Si el cliente j es parada, quiere decir que sale al menos 1 repartidor desde ahí, por lo tanto la sumatoria de los repartidores que salen debe ser mayor a 4 ya que en este caso la variable p_j es igual a uno. En cambio si la suma de repartidores que salen de j es menor a 4, obliga a p_j a ser igual a cero generando que no pueda ser parada y no puedan salir reaprtidores desde allí.

(13) Los clientes i que están en el conjunto de entregas exclusivas (`E`) deben ser atendidos únicamente por el camión. Por lo tanto, se pide que el camion llegue una vez a cada cliente i.

3. Resolución

El modelo se resuelve mediante programación entera mixta (MIP), utilizando un solver como CPLEX. Se establecen límites de tiempo de ejecución y tolerancia de optimalidad relativa según la capacidad computacional disponible y los tamaños de instancia.

4. Experimentación

Nuestro objetivo es responder preguntas como:

- ¿Cómo afecta la distancia máxima permitida ($d_{\max}$) a la cantidad de entregas posibles con repartidores?
- ¿Qué pasa si aumentamos el costo del repartidor?
- ¿Qué impacto tiene exigir un mínimo de entregas por repartidor?
- ¿Cuánto perjudica tener muchos pedidos refrigerados?
- ¿Cuál es el beneficio de tener clientes exclusivos?

4.1. Experimento 1

En esta sección evaluamos cómo responde el modelo ante variaciones en parámetros clave. Se analizó una instancia generada aleatoriamente con n = 50 clientes, costos de camión aleatorios entre 25 y 50 y distancias aleatorias entre 1 y 50. Los archivos utilizados son *instancia1_50_dmaxchicobarato.txt*, *instancia1_50_dmaxchicocaro.txt*, *instancia1_50_dmaxgrandebarato.txt* y *instancia1_50_dmaxchicocaro.txt*. En el modelo original, solo con camión, el valor óptimo fue de 1282.

Primero realizamos distintos experimentos con la misma instancia cambiando el valor de los parametros $d_{\max}$ y el costo del repartidor, sin pedidos refrigerados ni exclusivos, obteniendo los siguientes resultados:

d_max	**costo_repartidor**	**Resultado del experimento**
10	10	615
10	25	1250
25	10	564
25	25	1250

Cuadro 1: Resultados del experimento para distintas combinaciones de `d_max` y `costo_repartidor`.

Los cuatro escenarios muestran dos regímenes bien diferenciados: cuando el `costo_repartidor` es bajo, el modelo explota fuertemente a los repartidores y el costo total cae de forma marcada; cuando el `costo_repartidor` es alto, el modelo prácticamente no los usa y la solución degenera al recorrido casi camión puro.

Con `costo_repartidor`=10, aumentar $d_{\max}$ de 10 a 25 genera una mejora marginal adicional (de 615 a 564), es decir, un ahorro relativo de $\sim 8{,}3\,\%$ respecto del caso $d_{\max} = 10$, y de $\sim 55\,\%$ respecto del escenario sin repartidores (1282). Esto indica que $d_{\max}$ es un parámetro importante sólo cuando el costo del repartidor es competitivo: ampliar el radio permite concentrar al camión en nodos parada y despachar más pedidos a pie/bici, reduciendo aristas caras del tour del camión. En cambio, cuando `costo_repartidor`=25, el costo total permanece en 1250 independientemente de $d_{\max}$, lo que confirma que un mayor alcance no sirve si la alternativa es demasiado cara.

En síntesis, los datos no sólo muestran que "con repartidores baratos conviene usarlos", sino que revelan un **punto de quiebre económico**, que $\boldsymbol{d_{\max}}$ sólo crea valor cuando el repartidor es competitivo, y que la política óptima puede formularse como una comparación sistemática entre el costo del repartidor y el costo marginal del camión para cada cliente, lo que habilita reglas de decisión simples y escalables.

Luego de hacer la comparación de estos parámetros usamos la mejor de estas 4 opciones ($d_{\max} = 25$, `costo_repartidor`=10) para fijarnos qué sucedia si aparecian pedidos refrigerados y/o exclusivos, y también teniendo en cuenta la restricción de mas de 4 pedidos por repartidor. Los archivos utilizados son: *instancia1_50_exclusivos.txt*, *instancia1_50_refrigerados.txt* y *instancia1_50_refriyexclusivos.txt*.

Escenario	**Costo total del experimento**
Con refrigerados	600
Más de 4 sin exclusivos	564
Con exclusivos	712
Con refrigerados y exclusivos	712

Cuadro 2: Resultados del experimento considerando nuevas restricciones.

Para el primer escenario se consideró que 10 clientes seleccionados de forma aleatoria poseen pedidos que requieren refrigeración. Al introducir esta condición, se activa la restricción que limita a un repartidor a entregar como máximo un pedido refrigerado. Esto implica que varias entregas que anteriormente podían realizarse mediante repartidores (más económicos) ahora deben ser cubiertas por el camión, lo cual tiende a incrementar el costo total del sistema.

En esta instancia, el costo óptimo aumentó de 564 (sin pedidos refrigerados) a 600 con la inclusión de la restricción de refrigeración. Este incremento de aproximadamente un 6,4 % refleja el costo adicional de reorganizar las rutas y utilizar más el camión para cumplir con las condiciones de refrigeración. Sin embargo, es importante notar que el aumento no resulta excesivamente significativo. Esto sugiere que el modelo logra seguir aprovechando de forma eficiente los repartidores para aquellos clientes sin esta restricción.

Además, el impacto de los pedidos refrigerados tenderá a ser proporcional a la densidad de clientes y al valor de $d_{\max}$. En escenarios con muchos clientes cercanos entre sí, la presencia de pedidos refrigerados puede ser amortiguada porque el camión ya debe pasar cerca de dichos clientes para cumplir otras entregas. Por otro lado, en instancias donde los clientes se encuentren más dispersos, es posible que los pedidos refrigerados obliguen a realizar recorridos adicionales con el camión, incrementando el costo de forma más notoria. En síntesis, aunque la presencia de pedidos refrigerados genera un aumento en el costo, su impacto no parece crítico para instancias de tamaño medio o grande, siempre que la estrategia de paradas y repartidores esté bien optimizada.

A continuación, se analizó el modelo incorporando las restricciones deseables. En primer lugar, se ejecutó la misma instancia sin pedidos refrigerados ni exclusivos, para así estudiar el impacto del agregado de la condición de que cada repartidor debe realizar al menos 4 pedidos. De forma sorprendente, el valor óptimo del modelo no se modificó y permaneció exactamente igual que en el escenario sin esta restricción.

Este resultado sugiere que, cuando la cantidad de clientes es grande, la exigencia de un mínimo de 4 pedidos por repartidor no genera ningún impacto negativo en los costos ni en la solución óptima. Esto se debe a que la estructura de las rutas y la densidad de pedidos permite naturalmente que los repartidores asignados alcancen o superen ese umbral de entregas, sin necesidad de cambios significativos en el plan de distribución.

En términos prácticos, esto implica que la empresa puede aceptar sin inconvenientes una política que requiera un número mínimo de 4 entregas por repartidor, ya sea porque la empresa de repartidores imponga esta condición operativa o porque los costos asociados al uso de un repartidor recién se justifiquen cuando se cubren varias entregas en un mismo recorrido. Para instancias con muchos clientes, esta restricción resulta prácticamente irrelevante en términos de optimización de costos. No obstante, sería recomendable estudiar cómo se comporta este efecto en escenarios con menos clientes, donde podría no ser tan fácil cumplir con el mínimo de 4 pedidos y la restricción podría generar incrementos de costo.

El siguiente experimento consistió en asignar pedidos exclusivos a 10 clientes seleccionados de forma aleatoria, lo que implica que esas entregas deben ser realizadas obligatoriamente por el camión. Como era de esperarse, el valor óptimo del modelo aumentó de 564 (escenario base) a 725. Este incremento de aproximadamente un 28 % se debe a que algunas entregas que antes se podían delegar a repartidores —aprovechando costos menores y rutas más flexibles— ahora se vuelven obligatorias para el camión, incluso cuando estas resultan costosas debido a su localización.

La selección aleatoria de los clientes exclusivos refuerza este efecto, ya que la probabilidad de que algunos de ellos se encuentren en zonas alejadas o poco convenientes para el recorrido del camión es alta. De esta manera, el modelo pierde capacidad de optimizar rutas y asignaciones, lo que se traduce en un aumento directo de los costos.

Desde el punto de vista de la empresa, este resultado plantea una disyuntiva estratégica. Tener clientes exclusivos puede aportar valor comercial o fidelización, pero al mismo tiempo impone una rigidez logística que encarece el servicio. Es necesario analizar si los beneficios de mantener este tipo de clientes compensan el incremento en los costos operativos. Además, a medida que la cantidad de clientes exclusivos aumenta, el impacto sobre el costo total se vuelve más pronunciado.

Por último, analizamos una instancia que combina simultáneamente los mismos 10 pedidos refrigerados y los mismos 10 pedidos exclusivos utilizados en los experimentos previos, siendo ambos conjuntos de clientes completamente distintos. A pesar de agregar esta nueva restricción, el valor óptimo obtenido fue exactamente el mismo que en el escenario con solo pedidos exclusivos.

Este resultado se explica porque, aunque los pedidos refrigerados introducen la limitación de que solo uno de ellos puede ser entregado por cada repartidor, el modelo logró adaptarse sin incrementar el costo total. Esto ocurre debido a que los 10 exclusivos ya obligaban al camión a realizar un recorrido más amplio y costoso, cubriendo gran parte de las zonas en las que se encuentran los pedidos refrigerados. En consecuencia, el costo marginal de atender estos pedidos refrigerados fue absorbido por el recorrido del camión, sin generar rutas adicionales ni necesidad de contratar repartidores extra.

Este hallazgo indica que la combinación de restricciones no siempre implica un aumento acumulativo del costo: cuando el camión ya debe cubrir zonas por razones de exclusividad, la incorporación de pedidos refrigerados no tiene un impacto adicional. Para la empresa, esto significa que la coexistencia de clientes exclusivos y clientes con productos refrigerados no necesariamente incrementa el costo de manera significativa, siempre y cuando el diseño de rutas logre aprovechar estas superposiciones.

Con el objetivo de reforzar nuestras conclusiones respecto al impacto de los pedidos refrigerados, la cantidad mínima de entregas por repartidor y los pedidos exclusivos, realizamos la misma serie de experimentos sobre dos instancias aleatorias adicionales, ambas tambien de 50 clientes. Los archivos utilizados son : *instancia3_50.txt* (sin refrigerados ni exclusivos), *instancia3_50_refrigerados.txt*, *instancia3_50_exclusivos.txt*, *instancia1_50_refriyexclusivos.txt*, *instancia4_50.txt* (sin refrigerados ni exclusivos), *instancia4_50_refrigerados.txt*, *instancia4_50_exclusivos.txt*, *instancia4_50_refriyexclusivos.txt*.

En las dos se observaron resultados consistentes con los obtenidos en la instancia principal, lo que nos brinda una mayor confianza en la validez de las tendencias detectadas. En particular, para esta nueva instancia, el modelo sin pedidos refrigerados ni exclusivos y sin restricciones deseables arrojó un valor óptimo de 280, el cual utilizamos como punto de referencia para realizar las comparaciones posteriores.

Escenario	**Costo total del experimento**
Con refrigerados	293
Más de 4 sin exclusivos	280
Con exclusivos	354
Con refrigerados y exclusivos	354

Cuadro 3: Resultados del experimento considerando nuevas restricciones instancia 2.

En la siguiente instancia, el modelo sin pedidos refrigerados ni exclusivos y sin restricciones deseables arrojó un valor óptimo de 881, el cual utilizamos como punto de referencia para realizar las comparaciones posteriores.

Escenario	**Costo total del experimento**
Con refrigerados	912
Más de 4 sin exclusivos	881
Con exclusivos	1129
Con refrigerados y exclusivos	1129

Cuadro 4: Resultados del experimento considerando nuevas restricciones instancia 2.

Por lo tanto nuestras recomendaciones para la empresa son:

- Ajustar la correlación entre $d_{\max}$ y `costo_repartidor`, en la medida que sea posible, aumentar lo mas posible la distancia y disminuir lo mas posible el costo.
- Mantener el sistema con repartidores a pesar de contar con muchos clientes con pedidos refrigerados, ya que sigue siendo rentable a comparación de usar solo el camión.
- Evaluar la viabilidad de establecer un límite en la cantidad de pedidos exclusivos por recorrido, de modo que el modelo pueda seguir siendo eficiente.
- Ofrecer un servicio premium para clientes exclusivos, con tarifas que reflejen el costo adicional que suponen estas restricciones, o incluso evaluar si es conveniente mantenerlos en función del equilibrio entre rentabilidad y fidelización.
- Mantener el sistema que requiere mas de 4 entregas por repartidor siempre y cuando se cuente con una cantidad alta de clientes o, en todo caso, disminuir la cantidad mínima de pedidos por repartidor.

4.2. Experimento 2

Para poder mejorar el analisis previamente hecho plantemaos un nuevo experimento para ver si obtenemos las mismas conclusiones. En este experimento generamos una instancia con la misma cantidad de clientes, $n = 50$, sin productos refrigerados ni entregas exclusivas. Los valores elegidos para el costo del repartidor (c_r) y la distancia máxima ($d_{\max}$) buscan representar un rango amplio de escenarios posibles en la práctica:

- Se consideraron valores de c_r entre 10 y 50, abarcando desde repartidores altamente económicos hasta casos donde su uso es prácticamente inviable por el alto costo.
- Los valores de $d_{\max}$ oscilan entre 100 y 500 unidades, lo que permite evaluar desde repartidores de alcance muy limitado hasta repartidores capaces de cubrir toda la instancia.

En conjunto, estos valores permiten explorar con precisión el efecto combinado de estas dos variables clave en la eficiencia del modelo.

Adicionalmente, se fijaron los parámetros de la instancia con dist entre (100, 300) y costo entre (40, 50). Estos valores fueron elegidos deliberadamente para que el reparto con el camión no sea trivialmente barato ni extremadamente costoso:

- Las distancias entre (100–300) se mantienen acotadas dentro del rango de algunos valores de $d_{\max}$, permitiendo que los repartidores puedan asumir entregas locales en muchos casos.
- Los costos entre (40–50) hacen que cada entrega realizada por el camión tenga un costo considerable, incentivando así el uso de repartidores cuando su relación entre alcance y costo es favorable.

Esta configuración busca generar un escenario no sesgado, en el que el uso del camión no siempre sea óptimo por defecto, sino que dependa de una evaluación costo-beneficio frente al uso de repartidores. De este modo, se maximiza la capacidad del modelo para mostrar diferencias en el rendimiento bajo distintas configuraciones.

4.2.1. Análisis del ahorro en función de c_r y $d_{\max}$

Para este inciso se utilizaron los archivos *instancia2_50_dmaxvscostos_i_j.txt*, donde el índice i indica que el costo del repartidor en ese archivo es $10 \times i$, y el índice j indica que el valor de $dmax$ es $100 \times j$.

Con el fin de analizar el **ahorro porcentual** del modelo con repartidores respecto al modelo clásico con camión, planteamos un mapa de calor en función de estos dos parámetros clave: el **costo del repartidor** c_r (en el eje vertical) y la **distancia máxima de entrega** $d_{\max}$ (en el eje horizontal). El ahorro porcentual esta dado por:

$$\text{Ahorro (\%)} = \frac{Costo_{\text{camión}} - Costo_{\text{bicis}}}{Costo_{\text{camión}}} \times 100$$

Obteniendo el siguiente resultado:

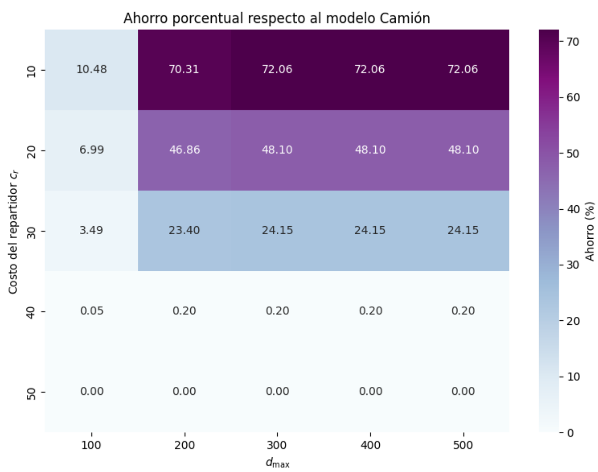

Figura 1: Ahorro porcentual respecto al modelo Camión según c_r y $d_{\max}$

El grafico Figura 1 revela varios patrones relevantes:

- Cuando el **costo del repartidor es bajo** ($c_r = 10$) y la **distancia máxima de reparto es alta** ($d_{\max} \geq 200$), el modelo con repartidores logra ahorros muy significativos, que superan el 70 %. Esto se debe a que el camión puede detenerse estratégicamente en puntos centrales y delegar múltiples entregas a repartidores de bajo costo, evitando visitas costosas a cada cliente.
- A medida que **aumenta el costo del repartidor**, el beneficio relativo disminuye. Para $c_r = 20$, los ahorros oscilan entre el 47 % y el 48 %, mientras que con $c_r = 30$, los ahorros caen a valores cercanos al 24 %. Este comportamiento es esperable: los repartidores siguen siendo útiles, pero su costo empieza a compensar parcialmente el beneficio logístico que brindan.
- Con costos más altos ($c_r = 40$ y 50), el ahorro prácticamente desaparece. Incluso con distancias máximas elevadas, el modelo opta por soluciones más cercanas al recorrido clásico del camión, debido a que el uso de repartidores ya no resulta económicamente ventajoso.
- El impacto de $d_{\max}$ también es claro: **con radios bajos** ($d_{\max} = 100$), los repartidores apenas pueden alcanzar clientes cercanos, lo que limita su utilidad. Sin embargo, al aumentar el radio, se habilitan combinaciones más eficientes de entregas agrupadas, permitiendo aprovechar mejor el modelo.

Este comportamiento no debe analizarse de forma aislada: está fuertemente condicionado por los parámetros utilizados al generar las instancias. En particular:

- Las distancias fueron fijadas en el rango `(100, 300)`. Esto implica que muchos clientes están razonablemente cerca unos de otros, pero no necesariamente a poca distancia del depósito. Por eso, cuando $d_{\max} \geq 200$, los repartidores pueden cubrir zonas completas de forma eficiente.
- Los costos del camión fueron definidos en el rango `(40, 50)`, lo cual representa entregas relativamente costosas para el modelo base. Esto refuerza el incentivo a usar repartidores de bajo costo, ya que cada cliente delegado representa un ahorro potencial considerable.
- En este contexto, el valor de $c_r = 10$ representa una situación ideal: cuesta menos de la mitad de un tramo del camión, y puede reemplazar varios. Pero a medida que c_r se acerca al costo promedio del camión, el ahorro se reduce o desaparece por completo.

Este análisis permite concluir que:

- El uso de repartidores es rentable solo cuando su costo unitario es suficientemente bajo y pueden alcanzar múltiples clientes por parada.
- Existe una fuerte **relacion** entre c_r y $d_{\max}$: ninguna de las dos variables es determinante por sí sola, sino que su efecto combinado define la zona de mayor ahorro.
- Las elecciones de `distancia` y `costo` son clave para definir el espacio donde el modelo colaborativo tiene margen de optimización. Si los costos del camión fueran bajos, o las distancias entre clientes muy grandes, la ventaja de los repartidores desaparecería.
- Este tipo de visualización puede utilizarse como herramienta de decisión para determinar si implementar repartidores es conveniente, dadas las características logísticas de un caso real.

4.2.2. Efecto del aumento de clientes refrigerados sobre el ahorro del modelo mixto

Para este inciso se utilizaron los archivos *instancia2_ 50_ agregandorefri_ i.txt*, donde el índice i indica que en ese archivo hay $10 \times (i - 1)$ refrigerados.

En este nuevo análisis, se utilizan exactamente las mismas instancias que en el mapa de calor, manteniendo fija la configuración de distancias y costos. La única diferencia es la incorporación progresiva de clientes refrigerados, lo que permite estudiar cómo esta restricción adicional afecta el ahorro relativo del modelo mixto respecto al camión.

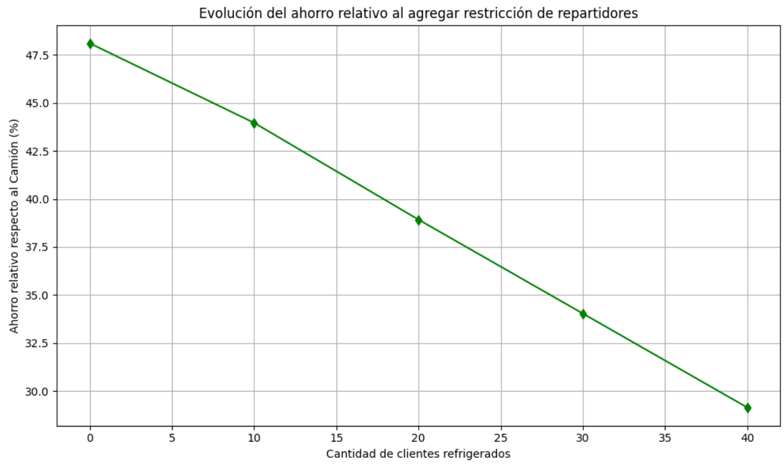

Figura 2: Evolución del ahorro relativo al agregar clientes refrigerados

En la Figura 2 se analiza la evolución del *ahorro relativo* que ofrece el modelo bicis (camión + repartidores) respecto al modelo clásico que utiliza únicamente un camión, a medida que se incrementa la cantidad de clientes refrigerados.

Como se observa, al aumentar la cantidad de clientes que requieren entrega refrigerada, el ahorro porcentual respecto al modelo con solo camión disminuye de manera prácticamente lineal. Inicialmente, con 0 clientes refrigerados, el modelo mixto permite un ahorro de casi un 48 %. Sin embargo, al llegar a 40 clientes refrigerados, este ahorro cae a menos del 30 %.

Este comportamiento se explica porque los repartidores pueden tener como mucho un cliente refrigerado, lo que obliga a asignarlos al camión. Esto limita el aprovechamiento del modelo mixto, reduce la flexibilidad en la asignación de rutas, y por lo tanto disminuye el ahorro que se podría obtener.

4.2.3. Impacto adicional de los clientes exclusivos: comparación entre modelos Deseables y Bicis

Para este inciso se utilizaron los archivos *instancia2_50_refrivsexclusi_i_j.txt*, donde el índice i indica que en ese archivo hay $10 \times (i-1)$ refrigerados y el j indica que hay $10 \times (j-1)$ exclusivos.

La siguiente figura presenta un mapa de calor que muestra el **impacto porcentual adicional en el costo total** al incorporar clientes **exclusivos**, es decir, aquellos que deben ser obligatoriamente atendidos por el camión. Para ello, se calcula la variación porcentual entre el modelo *Deseables* (que contempla esta restricción) y el modelo *Bicis* (que no la incluye):

$$\textbf{Impacto (\%)} = \frac{\text{Costo}_{\text{Deseables}} - \text{Costo}_{\text{Bicis}}}{\text{Costo}_{\text{Bicis}}} \times 100$$

El análisis se realiza para combinaciones crecientes de porcentaje de **clientes exclusivos** (eje vertical) y **clientes con pedidos refrigerados** (eje horizontal). Los resultados permiten observar con claridad el efecto que tiene la presencia de restricciones de exclusividad sobre los costos de distribución, en distintas condiciones logísticas.

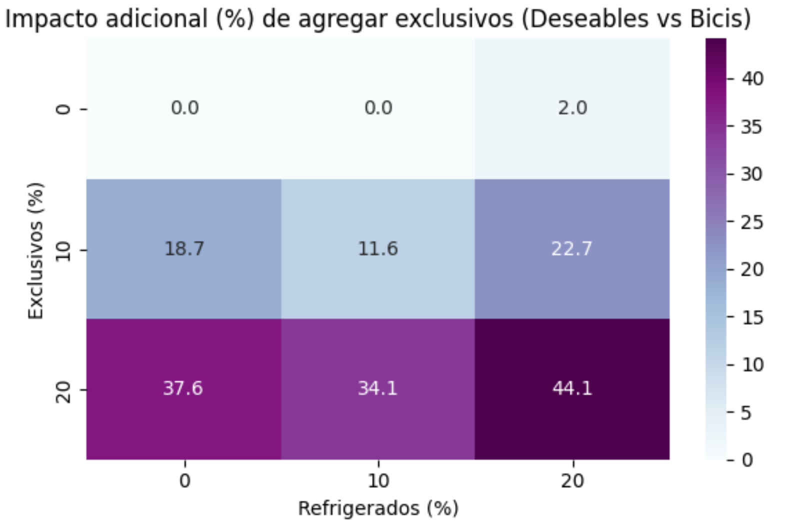

Figura 3: Impacto porcentual respecto al modelo Bicis según el porcentaje de exclusivos y refrigerados

Interpretación: A diferencia del mapa de calor anterior, este gráfico no muestra un beneficio, sino una **penalización**. Cada celda indica cuánto *aumenta el costo total* del modelo al exigir que ciertos clientes sean atendidos exclusivamente por el camión, es decir, al pasar del modelo *Bicis* (sin restricciones de exclusividad) al modelo *Deseables* (con la restricción de exclusivos).

Un valor más alto implica que la restricción de exclusividad perjudica más la eficiencia del modelo, obligando al camión a realizar rutas menos óptimas o a visitar clientes que podrían haber sido atendidos por repartidores.

Observaciones destacadas:

- Cuando no hay clientes exclusivos (**0 %**), el impacto adicional es nulo, como era de esperarse: el modelo Deseables se reduce al modelo Bicis y por lo tanto sus costos son iguales. Este resultado valida el cálculo y refuerza que la diferencia es exclusivamente atribuible a la incorporación de la restricción de exclusividad.

- Para proporciones moderadas de clientes exclusivos (**10 %**), el impacto adicional oscila entre un 11.6 % y un 22.7 %, dependiendo de la proporción de refrigerados. Esto indica que incluso una cantidad moderada de restricciones de exclusividad puede afectar de forma significativa el costo total, especialmente cuando coincide con zonas poco accesibles para los repartidores o alejadas de las paradas óptimas del camión.

- El efecto es particularmente fuerte cuando se combinan altos porcentajes de exclusivos y refrigerados (**20 % y 20 %**), alcanzando un **incremento del 44.1 %** respecto al modelo Bicis. Este valor es consistente con lo observado en los análisis previos: la combinación de restricciones simultáneas limita fuertemente las opciones del modelo, obligando al camión a cubrir zonas más amplias, y deteriorando la eficiencia.

- De manera general, se observa una **relación aproximadamente creciente entre la proporción de exclusivos y el impacto en el costo**, aunque no es perfectamente lineal. La presencia de pedidos refrigerados también amplifica el efecto de los exclusivos, ya que ambos factores fuerzan al modelo a usar el camión más allá de lo óptimo.

La siguiente figura muestra el **costo total absoluto** de cada uno de los tres modelos evaluados (Camión, Bicis y Deseables), para distintas combinaciones de proporciones de clientes refrigerados (R) y exclusivos (E). A diferencia de los mapas de calor anteriores, esta visualización permite observar de manera directa cómo se comporta cada modelo en términos monetarios ante el agregado de restricciones logísticas.

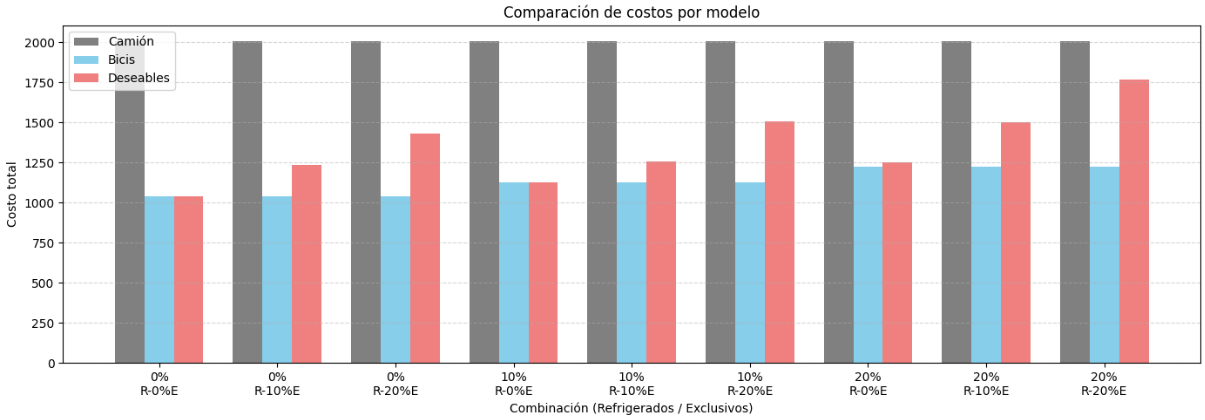

Figura 4: Costo total por modelo según combinación de porcentajes de clientes refrigerados (R) y exclusivos (E)

Aspectos destacados:

- El modelo **Camión** mantiene un costo constante, ya que no se ve afectado por las restricciones adicionales. Actúa como línea base.
- El modelo **Bicis** logra siempre un costo menor, mostrando el potencial de ahorro incluso en presencia de pedidos refrigerados. Sin embargo, su costo crece suavemente al aumentar R, debido a la limitación de una entrega refrigerada por repartidor.
- El modelo **Deseables**, que incorpora la restricción de clientes exclusivos, muestra un incremento más marcado. A medida que aumentan R y E simultáneamente, el costo total se acerca al del modelo Camión, reflejando una pérdida de flexibilidad operativa.

Conclusión operativa:

- Los gráficos evidencian que los **clientes exclusivos tienen un impacto mucho más severo sobre los costos que los pedidos refrigerados**, especialmente cuando ambas restricciones se combinan. El modelo pierde capacidad de delegar entregas a repartidores, aumentando la dependencia del camión y deteriorando la eficiencia general.

5. Evaluación de rendimiento con múltiples instancias

Con el objetivo de obtener conclusiones más robustas y evitar generalizaciones prematuras basadas en instancias aisladas, decidimos ejecutar cada uno de los tres modelos (Camión, Bicis y Deseables) sobre un conjunto de 10 instancias generadas aleatoriamente con $n = 100$ clientes. Los archivos utilizados son: *instancia_100_tiempos_i*. Este procedimiento permite capturar el comportamiento medio y la variabilidad en el tiempo de cómputo de cada formulación bajo diferentes configuraciones del solver CPLEX, incluyendo las estrategias de ramificación (por profundidad y por mejor cota) y la activación o desactivación del preprocesamiento.

5.1. Distribución de tiempos por instancia y configuración

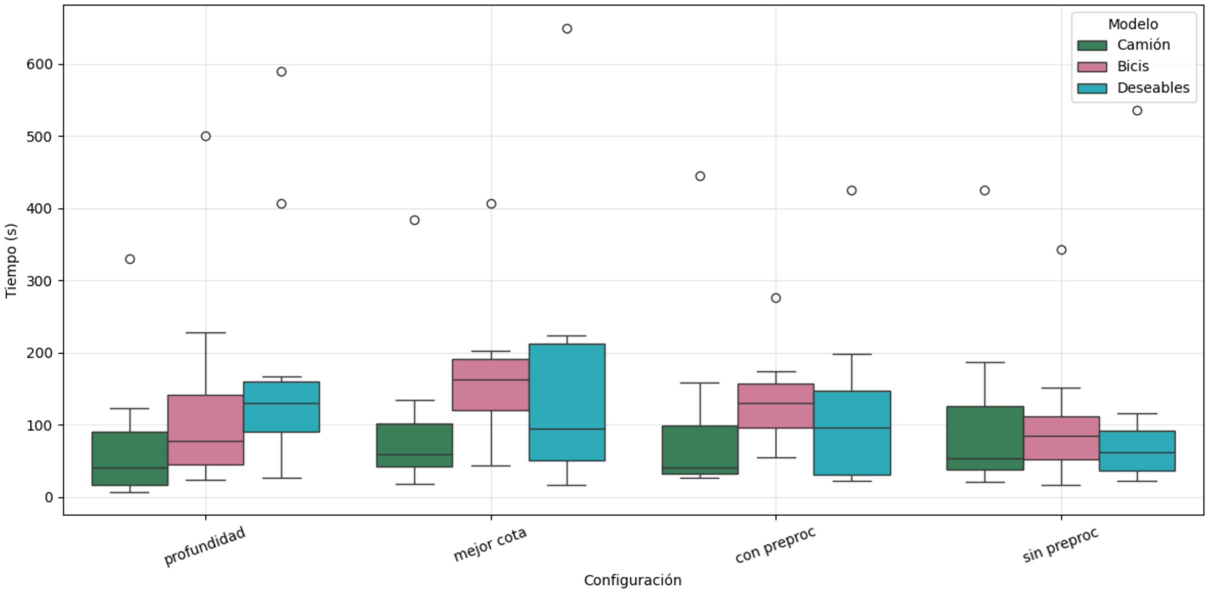

Figura 5: Distribución del tiempo de resolución por modelo y configuración (10 instancias por modelo).

En la Figura 5 se presentan los diagramas de caja que resumen los tiempos de resolución de CPLEX para 10 instancias distintas, evaluando los tres modelos propuestos (Camión, Bicis y Deseables) bajo diferentes configuraciones del solver: ramificación por profundidad, ramificación por mejor cota y uso de preprocesamiento (activado y desactivado).

Este tipo de visualización permite comparar la mediana de los tiempos, la dispersión, la presencia de valores atípicos (*outliers*) y la consistencia entre ejecuciones.

Modelo Camión. Al ser el más simple estructuralmente (básicamente un TSP con restricciones MTZ), el modelo Camión muestra los menores tiempos de resolución en todas las configuraciones. En particular:

- La estrategia de **ramificación por profundidad** resultó ser la más eficiente y estable: los tiempos están altamente concentrados alrededor de la mediana, con muy baja dispersión.
- Las configuraciones con **preprocesamiento** o **mejor cota** no ofrecieron mejoras claras, e incluso en algunos casos se observó un leve aumento del tiempo promedio.

Este comportamiento es esperable: en modelos de baja complejidad, una estrategia sistemática como por profundidad puede resolver el problema eficientemente sin necesidad de técnicas adicionales, que en estos casos introducen sobrecarga innecesaria.

Modelo Bicis. Este modelo incorpora asignaciones a repartidores, lo que introduce nuevas variables y restricciones, aumentando la complejidad. En este caso:

- La configuración **sin preprocesamiento** es la que obtiene la mediana más baja, con tiempos razonablemente bajos y sin valores extremos.
- La opción de **preprocesamiento** muestra una dispersión algo mayor, con varios *outliers*, aunque mantiene una mediana aceptable.
- La estrategia de **profundidad** genera la mayor variabilidad, con tiempos que en varios casos superan los 400 segundos, reflejando ineficiencia en ciertas instancias.
- La configuración con **mejor cota** presenta una mediana más alta que las anteriores y una dispersión moderada, con algunos valores elevados pero sin tantos casos extremos como en la estrategia por profundidad.

Esto sugiere que el modelo Bicis es sensible a la configuración del solver, y que ninguna estrategia domina claramente a las demás. Aunque el preprocesamiento puede contribuir a estabilizar el comportamiento en ciertas instancias, no siempre garantiza los mejores tiempos. La elección de la estrategia debe adaptarse a la estructura concreta del problema.

Modelo Deseables. Este modelo es el más complejo de los tres, ya que además de la lógica del modelo Bicis, incluye restricciones de cardinalidad (mínimo de entregas por repartidor) y cobertura (clientes exclusivos). Sin embargo, su desempeño computacional resulta bastante controlado:

- La configuración **sin preprocesamiento** es la que logra la mediana más baja entre todas las variantes, lo que indica que, en este caso, la simplificación previa no aporta ventajas e incluso puede ser contraproducente.
- La opción de **preprocesamiento**, aunque más dispersa, mantiene una buena mediana y pocos *outliers*, por lo que sigue siendo competitiva.
- Las configuraciones de **profundidad** y **mejor cota** muestran mayor dispersión y tiempos más altos en general, con varios valores extremos que evidencian una mayor inestabilidad del solver bajo estas estrategias cuando enfrenta restricciones complejas.

Este comportamiento pone en evidencia que el preprocesamiento no es universalmente ventajoso: en modelos con lógica altamente restrictiva, puede ser preferible permitir que el solver explore directamente el árbol original sin transformaciones previas.

5.2. Promedio de tiempos por modelo y configuración

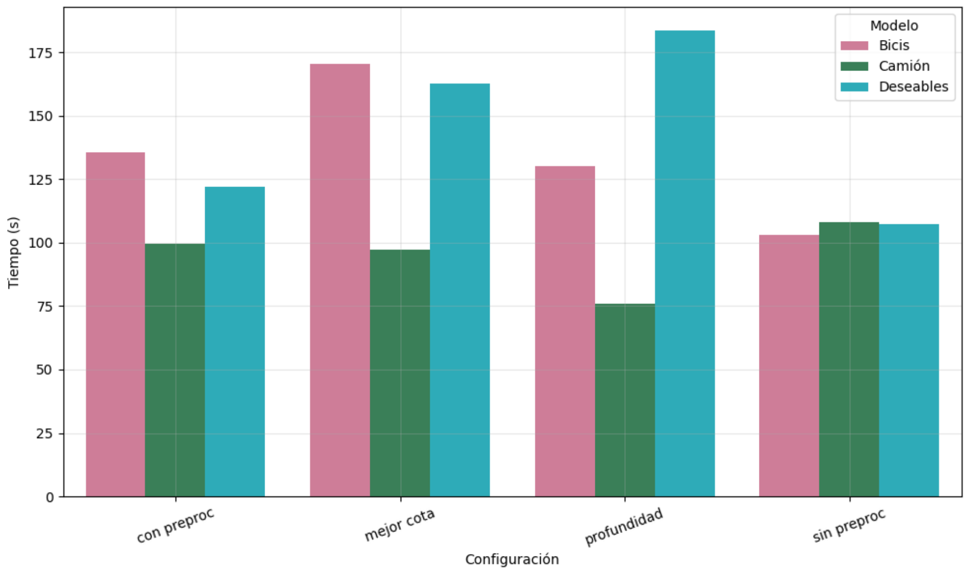

Figura 6: Tiempo promedio por modelo y configuración (10 instancias por modelo).

La Figura 6 complementa el análisis anterior al mostrar los tiempos **promedio** de resolución para cada modelo bajo las distintas configuraciones evaluadas. Esta representación permite consolidar las tendencias generales observadas en los boxplot (Figura 5), eliminando el impacto de valores atípicos y facilitando una comparación directa entre modelos y configuraciones.

En el caso del modelo **Camión**, se confirma que la configuración basada en búsqueda por *profundidad* es la más eficiente en términos de tiempo promedio. Esta estrategia, al ser simple y poco costosa en decisiones auxiliares, resulta particularmente efectiva cuando el espacio de soluciones es más reducido y las restricciones menos densas. Las demás configuraciones (incluyendo preprocesamiento y mejor cota) no aportan mejoras sustanciales e incluso muestran tiempos ligeramente superiores, reafirmando que para problemas con baja complejidad estructural, lo mejor suele ser mantener el enfoque más directo posible.

Para el modelo **Bicis**, el análisis de promedios coincide con la observación previa de las medianas: la configuración **sin preprocesamiento** es la más eficiente, con el tiempo promedio más bajo entre todas las variantes. Esto refuerza la idea de que, si bien el preprocesamiento puede ayudar a estabilizar ciertas ejecuciones (como se vio en la dispersión del boxplot), no necesariamente aporta beneficios en términos de tiempo acumulado, y puede incluso introducir sobrecarga adicional cuando la instancia no es lo suficientemente compleja. La estrategia con **mejor cota** es la menos favorable en este modelo, con el promedio más alto.

En el modelo **Deseables**, se observa una situación similar: la configuración **sin preprocesamiento** logra el mejor tiempo promedio, incluso en presencia de una estructura compleja con múltiples restricciones cruzadas. Aunque el preprocesamiento mejora la dispersión y reduce algunos *outliers*, como se vio en la Figura 5, no logra superar a la estrategia sin preprocesamiento en términos de eficiencia media. En cambio, la búsqueda por *profundidad* es la configuración más costosa, confirmando su vulnerabilidad ante estructuras combinatorias densas.

En cuanto a la estrategia basada en **mejor cota**, se observa que su rendimiento promedio es intermedio en todos los modelos. Esto coincide con lo visto en el boxplot: si bien no produce los peores tiempos, tampoco logra destacarse como la mejor opción. Su efectividad parece depender más de las características específicas de cada instancia que de una ventaja estructural general, y debe utilizarse con criterio según el contexto.

5.3. Conclusión general sobre configuraciones

El análisis de los tiempos evidencia que no existe una configuración universalmente superior para todos los modelos. La estrategia óptima depende tanto de la complejidad estructural del modelo como del tipo de restricciones impuestas. En particular:

- En el modelo *Camión*, de baja complejidad, todas las configuraciones son eficientes, pero la búsqueda por **profundidad** se destaca por ofrecer los mejores tiempos promedio sin necesidad de técnicas adicionales.

- En el modelo *Bicis*, la configuracion **sin preprocesamiento** muestra el mejor desempeño. En cambio, la estrategia de **mejor cota** presenta alta variabilidad y debe evitarse en contextos sensibles al tiempo de cómputo.

- En el modelo *Deseables*, a pesar de su mayor complejidad, la configuración **sin preprocesamiento** logra los menores tiempos promedio. El uso de preprocesamiento, si bien mejora la dispersión, no presenta una ventaja clara en eficiencia total.

Estos resultados refuerzan la importancia de adaptar la configuración del solver al tipo de modelo y a las características particulares de las instancias. Las estrategias más simples pueden ser óptimas en modelos estructuralmente sencillos, pero no escalan bien a modelos más complejos. Por otro lado, técnicas como el preprocesamiento no garantizan mejoras sistemáticas y pueden introducir sobrecostos en modelos donde no se requiere simplificación adicional.

En este contexto, se vuelve fundamental realizar una experimentación sistemática y cuidadosa antes de definir configuraciones por defecto. La combinación de métricas estadísticas (como promedios y boxplot) junto con un análisis cualitativo del comportamiento permite interpretar los resultados con mayor profundidad y tomar decisiones más informadas sobre la configuración más adecuada para cada situación.

6. Conclusión final

Los experimentos realizados muestran con claridad cómo la eficiencia del modelo depende de forma crítica de ciertos parámetros operativos. En primer lugar, el uso de repartidores solo resulta beneficioso cuando su costo unitario es lo suficientemente bajo y su radio de alcance es amplio. Ambos factores están fuertemente correlacionados: un repartidor barato pero con poco alcance no puede reemplazar al camión, y uno con mucho alcance pero demasiado costoso tampoco representa una alternativa rentable. Por lo tanto, la combinación adecuada de estas dos variables define una zona operativa óptima, dentro de la cual el modelo mixto logra ahorros considerables frente al esquema clásico basado únicamente en camiones.

En cuanto a los pedidos refrigerados, su impacto sobre el costo total es moderado. Si bien introducen una restricción relevante —solo uno por repartidor—, el modelo logra adaptarse y seguir asignando eficientemente el resto de las entregas. En escenarios con muchos clientes, especialmente cuando están bien distribuidos, los pedidos refrigerados no afectan de forma crítica el desempeño del sistema, y el modelo sigue superando al enfoque tradicional en términos de costo total.

Por el contrario, la presencia de pedidos exclusivos sí genera un deterioro significativo en la eficiencia. Al obligar a que ciertos clientes sean atendidos exclusivamente por el camión, se pierde flexibilidad en la asignación de rutas y se incrementan los costos. Este efecto se ve amplificado cuando los exclusivos están alejados de las rutas naturales o cuando se combinan con pedidos refrigerados. En estos casos, el camión debe asumir una mayor carga operativa, lo cual anula parcialmente los beneficios del uso de repartidores.

En lo que respecta a la restricción deseable —exigir un mínimo de entregas por repartidor—, se observó que en instancias con una cantidad considerable de clientes esta condición no altera la solución óptima. El modelo tiende naturalmente a asignar múltiples pedidos por repartidor, por lo que esta política puede implementarse sin afectar los costos, siempre que la escala del problema lo permita.

Finalmente, la combinación de restricciones no necesariamente produce un impacto acumulativo lineal. En varios escenarios, se observó que ciertas restricciones (como los pedidos refrigerados) no generaban un aumento adicional de costo cuando ya existían otras (como los exclusivos) que forzaban al camión a visitar zonas similares. Esto sugiere que, con un diseño de rutas inteligente, es posible amortiguar parcialmente los efectos negativos de múltiples restricciones simultáneas.

En síntesis, el análisis experimental confirma que el modelo mixto propuesto tiene un amplio potencial de ahorro en contextos realistas, pero su efectividad depende en gran medida de los costos, las distancias y la estructura de restricciones. Estos resultados proporcionan evidencia cuantitativa para diseñar políticas logísticas más eficientes, evaluar compromisos operativos y tomar decisiones estratégicas basadas en datos.