TRANSPORTANDO DATA

-Un abordaje cuantitativo de la red logística de Allen Logistics-

Ahumada Valverdi, Gonzalo Matias *– gonzaahum@gmail.com*
Cativa, Roque Mauricio *– Roquecativa@gmail.com*
Chávez, Lautaro Nicolas *– lautaronicochavez@gmail.com*
Facen, Federico Pascal *– fpfacen@gmail.com*
García Santander, Karen *– kagsantander@hotmail.com*
Sanchez Monasterio, Cesar *– cesar07sm03@gmail.com*
Valdez, Rodrigo Agustin *– rodrigo.valdez.cna.10@gmail.com*
Zúñiga, Janeth Aymará *– Janeth.aymara13@gmail.com*

ÍNDICE

Índice 1
Resumen 2
Introducción 4
Situación Problemática 5
Preguntas de Investigación 5
Objetivo General 5
Objetivos Específicos 5
Marco Metodológico 6
Marco Teórico 8
Aplicación 10
Preparación 11
Data Cleaning 14
Pronósticos y Programación 16
Resultados 21
Interpretación de Resultados 22
Recomendaciones 24
Conclusiones 26
Apéndice 27
Referencias 36

Resumen

Este trabajo aborda una problemática concreta de planificación logística en la empresa Allen Logistics, centrada en la articulación operativa entre los viajes troncales y subtroncales. A partir del análisis de una base de datos operativa, se aplicaron herramientas cuantitativas —específicamente modelos de pronóstico y programación lineal entera— con el objetivo de anticipar la demanda y optimizar la distribución de recursos logísticos.

El proceso metodológico incluyó la reorganización y estandarización de datos, la incorporación de parámetros operativos reales obtenidos mediante entrevista, la proyección de la demanda futura mediante modelos de series de tiempo, y el diseño de un modelo matemático de optimización bajo restricciones logísticas concretas. La solución óptima obtenida indica que es posible cubrir eficientemente la distribución subtroncal con un total de 23 viajes, respetando capacidades de carga, frecuencias operativas y plazos de despacho.

Los resultados obtenidos evidencian la utilidad de los modelos matemáticos en la toma de decisiones logísticas, así como el valor del enfoque cuantitativo para mejorar la eficiencia, anticiparse a la demanda y sostener procesos logísticos estratégicos basados en datos.

Palabras Clave:

Logística, pronóstico, programación lineal, optimización, viajes troncales, capacidad de carga, análisis cuantitativo.

Introducción

En el contexto actual de creciente complejidad operativa en los sistemas logísticos, la aplicación de herramientas cuantitativas constituye un recurso estratégico indispensable para optimizar procesos, asignar eficientemente los recursos y mejorar la toma de decisiones. Las organizaciones que operan en entornos altamente dinámicos, como es el caso del sector logístico, enfrentan desafíos relacionados con la variabilidad de la demanda, la distribución geográfica de sus operaciones y la necesidad de articulación entre distintos nodos de transporte. En este marco, el análisis cuantitativo de datos permite identificar patrones, establecer relaciones funcionales entre variables operativas y generar modelos predictivos que contribuyan a una planificación más eficiente.

El presente estudio se inscribe en el campo del análisis cuantitativo de negocios, y toma como caso de aplicación a la empresa Allen Logistics, una organización con presencia consolidada en el Noroeste Argentino (NOA), dedicada a la provisión de servicios postales mayoristas y logísticos integrales. En los últimos años, Allen Logistics ha experimentado un proceso de expansión que ha incrementado la complejidad de su red de distribución, especialmente en lo referido a la articulación entre los viajes troncales —correspondientes a rutas de alto volumen— y los subtroncales, orientados a destinos secundarios.

La empresa cuenta con una base de datos histórica que registra información detallada sobre estos viajes, pero hasta el momento no ha desarrollado herramientas analíticas que le permitan explotar dicho recurso en términos estratégicos. En este sentido, la investigación se propone abordar cuantitativamente la relación entre viajes troncales y subtroncales, utilizando técnicas de programación lineal, análisis estadístico, simulación y pronóstico mediante series de tiempo.

El estudio busca, por un lado, identificar proporciones operativas óptimas entre tipos de viaje y, por otro, desarrollar modelos predictivos que permitan anticipar la demanda futura de viajes troncales, con el objetivo de contribuir a una asignación más eficiente de los recursos y a la mejora de la gestión logística integral. Esta aproximación se fundamenta en los aportes teóricos de la investigación operativa y de la estadística aplicada, tal como han sido desarrollados en la literatura especializada, particularmente en los trabajos de Render et al. y Eppen et al., autores de referencia en el ámbito del análisis cuantitativo de negocios.

Situación Problemática

La creciente expansión territorial y operativa de Allen Logistics ha incrementado la complejidad de su red de distribución, exigiendo una articulación eficaz entre los viajes troncales —de alta carga y cobertura principal— y los subtroncales —de apoyo y conexión secundaria. No obstante, dicha articulación presenta inconsistencias operativas que se traducen en posibles redundancias logísticas, subutilización de la capacidad instalada y dificultades para anticipar la demanda futura de transporte.

A pesar de contar con registros históricos de sus operaciones, la empresa enfrenta desafíos vinculados a la ausencia de criterios formales para determinar la proporción adecuada de viajes subtroncales respecto a los troncales, lo cual impacta negativamente en la planificación y en la asignación eficiente de recursos. Asimismo, la variabilidad en la frecuencia y volumen de los viajes complica la anticipación de escenarios futuros, generando incertidumbre en la toma de decisiones estratégicas.

Estas condiciones evidencian la necesidad de caracterizar cuantitativamente el comportamiento de la red logística de la empresa, identificando factores estructurales que

expliquen la distribución actual de los viajes, así como de desarrollar herramientas de predicción que permitan mejorar la eficiencia operativa y reducir la incertidumbre.

Preguntas de Investigación

- ¿Qué tipo de relación cuantitativa se observa entre la cantidad de viajes troncales y subtroncales realizados por Allen Logistics en su red de distribución?
- ¿Qué variables operativas asociadas a los viajes troncales explican la distribución y frecuencia de los viajes subtroncales?
- ¿Qué modelo de optimización lineal permite proponer una combinación eficiente de viajes subtroncales en función de la carga transportada?
- ¿Qué método de pronóstico presenta el mejor ajuste para proyectar la demanda futura de viajes troncales a partir de datos históricos?

Objetivo General

Caracterizar y modelar cuantitativamente la relación entre los viajes troncales y subtroncales de Allen Logistics, a fin de proponer estrategias de planificación logística basadas en proporciones operativas óptimas y en pronósticos confiables de demanda.

Objetivos Específicos

- **Evaluar** la existencia de relaciones estructurales entre la cantidad de viajes troncales y subtroncales, mediante el estudio de patrones históricos registrados en la base de datos de la empresa.

- **Determinar** los factores operativos que explican la variación en los viajes subtroncales, en función de atributos de los viajes troncales (volumen, frecuencia, origen-destino, etc.).
- **Desarrollar** un modelo de optimización lineal que permita proponer una combinación eficiente de viajes subtroncales, alineada con la carga transportada y las restricciones logísticas.
- **Proyectar** la demanda futura de viajes troncales a partir de modelos de series de tiempo, con el objetivo de mejorar la capacidad predictiva y anticipatoria en la toma de decisiones logísticas.

Marco Metodológico

El presente estudio adopta un **enfoque cuantitativo**, dado que se propone examinar relaciones funcionales entre variables operativas medibles, así como construir modelos predictivos que faciliten la toma de decisiones logísticas. Este tipo de enfoque permite aplicar herramientas matemáticas y estadísticas sobre bases de datos estructuradas, con el objetivo de obtener resultados generalizables y útiles para la planificación estratégica.

Como **diseño** se aplica una investigación **no experimental**, dado que no se manipulan de forma deliberada las variables involucradas, sino que se observan y analizan tal como se presentan en los registros existentes. El estudio es de tipo **transeccional**, ya que se centra en el análisis de datos correspondientes a un período temporal definido, sin realizar un seguimiento longitudinal. En cuanto al **alcance**, se enmarca dentro de un diseño **correlacional-explicativo**, al buscar identificar relaciones significativas entre los viajes troncales y subtroncales, así como explicar cuáles son los factores operativos que determinan dicha relación. Adicionalmente, se

incorpora un componente predictivo, a través de la aplicación de técnicas de pronóstico por series de tiempo.

La **técnica de recolección de datos** empleada es el **análisis documental de fuentes primarias**. En particular, se trabaja con una base de datos interna proporcionada por Allen Logistics, la cual fue elaborada manualmente por el área de liquidaciones y contiene información histórica de los viajes troncales y subtroncales realizados en distintas zonas de cobertura. Esta fuente constituye un insumo operativo clave y presenta un nivel de estructuración suficiente para ser procesada mediante técnicas estadísticas y de modelado.

Previo al análisis, los datos serán sometidos a un proceso de depuración, verificación y estandarización, con el fin de garantizar su consistencia, integridad y pertinencia. Entre las variables consideradas se encuentran: tipo de viaje (troncal o subtroncal), fechas, volúmenes de carga transportada, origen y destino, frecuencia, entre otros atributos relevantes.

En cuanto a las **herramientas metodológicas**, se utilizarán distintas **técnicas de análisis cuantitativo** según la naturaleza de cada objetivo específico. Para caracterizar la relación entre viajes troncales y subtroncales, se emplearán modelos de correlación y regresión múltiple. Para proponer una combinación operativa eficiente de viajes subtroncales, se aplicará un modelo de optimización lineal utilizando el complemento Solver de Excel. Finalmente, para proyectar la demanda futura de viajes troncales, se utilizarán técnicas de pronóstico mediante series de tiempo con el software QM for Windows, seleccionando los modelos con menor error de ajuste.

Esta secuencia metodológica permite abordar el estudio desde una perspectiva integral, combinando diagnóstico, modelado y anticipación, en función de los desafíos logísticos actuales de la empresa y las posibilidades analíticas que ofrece la información disponible.

Marco Teórico

En el ámbito de la logística, la eficiencia operativa y la optimización de recursos son fundamentales para el éxito de las operaciones de transporte y distribución. Diversos conceptos y herramientas analíticas permiten comprender y mejorar estos procesos.

Viajes troncales y subtroncales

Los viajes **troncales** se refieren a operaciones de transporte de larga distancia que conectan centros de distribución principales o regiones geográficas amplias. Estos viajes suelen implicar el movimiento de grandes volúmenes de mercancías y constituyen el **eje central de la red logística**. Por otro lado, los viajes **subtroncales**, también conocidos como rutas capilares, se encargan de la distribución de mercancías desde los centros de distribución hasta los destinos finales o puntos de consumo, abarcando distancias más cortas y frecuencias de entrega más altas *(QuadMinds, s.f.).*

Capacidad ociosa

La capacidad ociosa se define como la porción de la capacidad productiva o de transporte que no se utiliza en un período determinado. En logística, esto puede manifestarse como vehículos que no operan a su máxima capacidad o infraestructuras subutilizadas. La capacidad ociosa representa una oportunidad perdida de eficiencia y puede generar costos adicionales para la empresa *(Gerencie.com, s.f.).*

Frecuencia logística

Se refiere a la regularidad con la que se realizan las operaciones de transporte o distribución. Determinar la frecuencia óptima permite equilibrar costos operativos y niveles de servicio, lo cual es esencial para una cadena de suministro eficiente *(Appvizer, s.f.).*

Capacidad de carga

En cuanto a la medición de la capacidad de carga, los vehículos suelen ser evaluados por su capacidad para transportar unidades como pallets o bultos. Esta medición permite planificar con mayor exactitud la utilización de espacio y recursos, reduciendo ineficiencias y evitando subutilización *(Well Pack, s.f.).*

Análisis Cuantitativo

El análisis cuantitativo, según Render et al. (2021), *"es el enfoque científico de la toma de decisiones administrativas"*, basado en la manipulación sistemática de datos para convertirlos en información útil y aplicable (p. 2). Este enfoque permite desarrollar modelos matemáticos que representan situaciones reales, facilitando la evaluación de alternativas y la selección de decisiones óptimas.

En particular, la programación lineal es una técnica que permite resolver problemas de asignación eficiente de recursos limitados. Su aplicación en logística facilita la formulación de combinaciones óptimas de variables bajo restricciones operativas. Render et al. (2021) destacan que *"el arte de formular modelos de programación"* requiere identificar claramente las variables de decisión, los parámetros y las restricciones que afectan el sistema (p. 3).

Por su parte, el uso de modelos de pronóstico mediante series de tiempo permite anticipar comportamientos futuros basándose en datos históricos. Esta técnica, especialmente

útil en logística para prever demanda, emplea métodos como promedios móviles, suavización exponencial y regresión lineal. Según los autores, *"el papel que desempeñan los datos históricos"* es clave en la precisión de las proyecciones generadas *(Render et al., 2021, p. 4)*.

La integración de estas herramientas contribuye a la toma de decisiones más informadas, a la planificación de escenarios alternativos y a la reducción de incertidumbre en entornos complejos y cambiantes como el logístico.

Aplicación

La articulación operativa entre los viajes troncales y subtroncales constituye un componente estratégico de la red logística de Allen Logistics. Sin embargo, la ausencia de herramientas formales de análisis ha limitado la capacidad de la empresa para evaluar y optimizar dicha relación. Esta problemática, abordada desde el enfoque cuantitativo presentado en Render et al. (2021), plantea la necesidad de desarrollar un modelo que caracterice dicha articulación y permita mejorar su planificación futura.

En este sentido, el presente trabajo se propone aplicar herramientas de análisis cuantitativo con el fin de responder a los interrogantes formulados en la investigación: *¿qué tipo de relación funcional existe entre los viajes troncales y subtroncales?*, *¿qué variables explican su comportamiento?*, y *¿es posible predecir la demanda futura a partir de los datos históricos disponibles?*

Para ello, el abordaje metodológico contempla las siguientes etapas:

- Relevamiento y comprensión de la base de datos provista por la empresa
- Entrevista con el personal clave para incorporar contexto operativo
- Depuración, ordenamiento y redefinición de la unidad de análisis
- Implementación de métodos de pronóstico mediante series de tiempo

- Identificación de variables relevantes y definición de parámetros logísticos
- Aplicación de programación lineal como técnica de optimización
- Análisis de resultados y discusión en función de la problemática inicial

El marco teórico que sustenta esta aplicación incluye nociones de eficiencia logística, capacidad ociosa, frecuencia de entrega y articulación de nodos de transporte, entre otros. Asimismo, se incorporan técnicas como la programación lineal —para definir combinaciones óptimas de recursos bajo restricciones— y los modelos de pronóstico —para anticipar escenarios operativos futuros— (Render et al., 2021; QuadMinds, s.f.; Gerencie.com, s.f.).

La aplicación se orienta, por tanto, a generar conocimiento útil y accionable para la mejora interna de la empresa, articulando variables logísticas como la frecuencia de envío, la capacidad de carga y el uso eficiente del tiempo, todo ello en función de restricciones operativas observadas.

Preparación

La etapa inicial del trabajo consistió en el acceso y revisión de una base de datos provista por el área de liquidación de viajes de Allen Logistics. Este registro contenía información detallada sobre los trayectos troncales y subtroncales realizados por la empresa en distintas zonas de cobertura. Sin embargo, su estructura original presentaba múltiples limitaciones para el tratamiento analítico: los datos estaban segmentados sin criterios homogéneos, se identificaron inconsistencias en los campos clave (como fechas, destinos y tipo de unidad), y no existía una definición clara de unidad de análisis.

Ante estas limitaciones, y con el objetivo de comprender con mayor profundidad la lógica operativa detrás del registro de datos, se llevó a cabo una entrevista semiestructurada con el encargado del área logística, el Sr. M.P., realizada en mayo de 2025 en la sede central de

Allen Logistics en San Miguel de Tucumán. Esta instancia cualitativa fue clave para incorporar contexto organizacional y operativo, y permitió complementar los datos con información de campo no documentada formalmente *(ver Apéndice A)*.

Uno de los principales aportes de la entrevista fue la identificación del eje troncal Buenos Aires – Tucumán (BUE–TUC) como el núcleo principal de la red logística. Esta ruta concentra la mayor parte de la carga, los costos operativos y el flujo general del sistema, lo que justifica su selección como subconjunto representativo para el análisis cuantitativo. Además, se destacó que la documentación de esta ruta es más robusta que la de otros trayectos, tanto en volumen de datos como en continuidad temporal y completitud de registros. En consecuencia, se tomó la decisión metodológica de acotar el estudio al tramo BUE–TUC y sus subtroncales asociados, para garantizar validez interna y consistencia de resultados.

A partir de esta delimitación, se procedió a un proceso de reorganización y depuración de la base de datos. En primer lugar, se redefinió la unidad de análisis: se pasó de registros fragmentados (campos separados por servicio, unidad o parcialidades de carga) a una estructura basada en viajes operativos completos, permitiendo asociar cada viaje con variables fundamentales como origen, destino, tipo (troncal o subtroncal), fecha, volumen de carga transportada y unidad logística empleada.

Durante la entrevista se identificaron también condiciones operativas críticas, como la existencia de una restricción temporal establecida por acuerdos logísticos: la carga que llega a Tucumán desde Buenos Aires debe ser despachada mediante viajes subtroncales en un plazo no mayor a tres días. Este parámetro temporal representa una restricción logística clave, ya que incide directamente en la planificación de salidas, la utilización de depósitos y la asignación de unidades. Aunque el promedio actual se sitúa en torno a los dos días, la exigencia contractual de tres días constituye el límite superior incorporado al modelo de optimización.

Otro aporte central de la entrevista fue la caracterización detallada de la capacidad de carga de las unidades asignadas a cada subtroncales, lo cual permite dimensionar la red secundaria en términos de posiciones de carga disponibles. Esta información es fundamental para establecer restricciones de capacidad en el modelo de programación lineal (Render et al., 2021). A continuación, se presenta un detalle de capacidades operativas por trayecto:

- Tucumán–Salta/Jujuy: 1 camión → 18 posiciones
- Tucumán–Santiago del Estero: 3 camionetas → 9 posiciones (3 cada una)
- Tucumán–Catamarca/La Rioja (compartido): 1 utilitario → 8 posiciones
- Tucumán–Catamarca (exclusivo): 1 camioneta → 4 posiciones
- Tucumán–La Rioja (exclusivo): 1 utilitario → 8 posiciones

Este relevamiento permitió identificar potenciales cuellos de botella o situaciones de subutilización dentro de la red secundaria, dependiendo del volumen de carga recibido desde el troncal y de la distribución geográfica de los envíos. Según Gerencie.com (s.f.), la capacidad ociosa representa una pérdida operativa que puede ser corregida mediante una planificación adecuada y un mejor aprovechamiento del recurso disponible.

La entrevista también aportó criterios para definir la frecuencia operativa, entendida como número de viajes promedio por semana, y señaló que ciertos trayectos (como Santiago del Estero) concentran una frecuencia superior por volumen de demanda.

De esta manera, la preparación concluye con la identificación de cinco conceptos claves que serán incorporados en las siguientes etapas del estudio:

1. Capacidad de carga por unidad y por trayecto (Well Pack, s.f.)
2. Frecuencia operativa promedio semanal (Appvizer, s.f.)
3. Restricción temporal de despacho en 72 horas
4. Relación funcional entre volumen de carga y capacidad disponible

5. Configuración y segmentación geográfica de la red subtroncal

Este abordaje permitió no sólo estructurar los datos para su análisis, sino también integrar las condiciones reales de operación, como las capacidades físicas de los vehículos, la restricción de tiempo de despacho y la proporción histórica de carga por destino, dentro de un marco formal de modelado.

Data Cleaning

Una vez reorganizada la base de datos según el tramo troncal seleccionado, se avanzó con el proceso de **depuración y estandarización de la información** con el objetivo de adaptar el archivo original a la unidad de análisis definida: el viaje operativo.

La base original respondía a una lógica de liquidación interna de la empresa, por lo cual estaba desagregada por cliente y por bulto transportado. Esta estructura, útil para determinar márgenes de rentabilidad y responsabilidades de facturación por razón social, dificultaba su uso analítico en términos logísticos. Específicamente, cada fila de la planilla correspondía a un movimiento individualizado por cliente, lo cual fragmentaba la visión del viaje como totalidad operativa. *(ver Figura 1: Base de datos sin depurar)*

Figura 1

Fragmento de base de datos sin depurar

Fuente: Elaboración de Allen Logistics.

Frente a esto, se procedió a una **reestructuración completa del archivo**, consolidando la información por viaje, de manera que cada registro represente un servicio logístico completo (origen–destino, fecha, carga transportada y unidad asignada). Esta reconstrucción requirió la identificación y agrupamiento de todos los bultos correspondientes a un mismo movimiento físico, utilizando como referencia la fecha del viaje, el recorrido realizado y el remito asociado.

El procedimiento de limpieza de datos incluyó:

- **Eliminación de duplicados**, inconsistencias y errores tipográficos (por ejemplo, variantes en los nombres de destinos como "Stgo del Estero" y "Sgo del Estero").
- **Unificación de criterios de codificación**, tanto en los campos de tipo de viaje como en las denominaciones de clientes, fechas y unidades.
- **Conversión de datos no estructurados en variables útiles**, como, por ejemplo: transformar las referencias a clientes en valores agregados de carga transportada por viaje.
- **Categorización de los viajes por el día de la semana en que fue realizado** (1 = lunes / 2 = martes, etc.), con el fin de facilitar análisis estadísticos posteriores.

Este proceso derivó en una nueva base de datos con estructura analítica, en la que cada fila representa un viaje operativo completo y cada columna corresponde a una variable clave. A partir de este punto, la base quedó en condiciones de ser procesada mediante herramientas cuantitativas, como modelos de regresión, optimización y pronóstico. *(ver figura 2: Base de datos depurada)*

Figura 2

Fragmento de la base depurada – Formato final

DISTRIBUCIÓN DE CARGA SUBTRONCAL POR DÍA EN VALORES ABSOLUTOS

Fecha	Salta/Jujuy	Santiago del Estero	Catamarca/La Rioja	Catamarca	La Rioja	Total
2/2/2024	0,00	1,63	2,72	0,00	0,00	4,35
5/2/2024	8,28	0,00	0,00	0,00	0,00	8,28
6/2/2024	0,00	3,10	3,20	0,00	0,00	6,30
7/2/2024	0,00	0,00	0,00	0,07	0,00	0,07
8/2/2024	16,86	0,00	0,00	0,00	0,00	16,86
9/2/2024	0,00	5,41	13,73	0,00	0,00	19,14
10/2/2024	12,64	0,00	0,00	0,00	0,00	12,64
14/2/2024	1,75	0,00	2,86	0,00	0,00	4,61
16/2/2024	0,00	0,00	0,00	1,69	0,00	1,69
19/2/2024	11,02	0,00	0,00	0,00	0,00	11,02
20/2/2024	0,00	4,23	3,31	0,00	0,00	7,54
21/2/2024	0,00	0,04	3,15	0,00	0,00	3,18
23/2/2024	0,00	0,00	2,45	0,00	0,00	2,45
26/2/2024	0,00	1,07	2,72	0,00	0,00	3,80
28/2/2024	7,14	0,05	0,00	0,00	0,00	7,19
1/3/2024	0,00	1,62	0,00	0,00	0,00	1,62
4/3/2024	26,51	0,00	0,00	0,00	0,00	26,51
5/3/2024	0,00	3,42	0,00	26,26	0,00	29,68
6/3/2024	0,00	0,00	1,97	0,00	0,00	1,97
8/3/2024	0,00	1,89	0,00	10,17	2,03	14,10
9/3/2024	19,75	0,00	0,00	0,00	0,00	19,75
12/3/2024	0,00	2,55	0,00	4,94	1,77	9,26
13/3/2024	27,07	0,00	0,00	4,19	1,66	32,92
15/3/2024	11,86	3,76	0,00	0,00	1,24	16,86

DISTRIBUCIÓN DE CARGA SUBTRONCAL POR DÍA EN VALORES RELATIVOS

Fecha	Salta/Jujuy	Santiago del Estero	Catamarca/La Rioja	Catamarca	La Rioja	Total
2/2/2024	0,00%	37,48%	62,52%	0,00%	0,00%	100%
5/2/2024	100,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	100%
6/2/2024	0,00%	49,24%	50,76%	0,00%	0,00%	100%
7/2/2024	0,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	100%
8/2/2024	100,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	100%
9/2/2024	0,00%	28,27%	71,73%	0,00%	0,00%	100%
10/2/2024	100,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	100%
14/2/2024	37,93%	0,00%	62,07%	0,00%	0,00%	100%
16/2/2024	0,00%	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	100%
19/2/2024	100,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	100%
20/2/2024	0,00%	56,14%	43,86%	0,00%	0,00%	100%
21/2/2024	0,00%	1,14%	98,86%	0,00%	0,00%	100%
23/2/2024	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	100%
26/2/2024	0,00%	28,27%	71,73%	0,00%	0,00%	100%
28/2/2024	99,33%	0,67%	0,00%	0,00%	0,00%	100%
1/3/2024	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	0,00%	100%
4/3/2024	100,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	100%
5/3/2024	0,00%	11,54%	0,00%	88,46%	0,00%	100%
6/3/2024	0,00%	0,00%	100,00%	0,00%	0,00%	100%
8/3/2024	0,00%	13,43%	0,00%	72,15%	14,41%	100%
9/3/2024	100,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	100%
12/3/2024	0,00%	27,53%	0,00%	53,33%	19,13%	100%
13/3/2024	82,22%	0,00%	0,00%	12,74%	5,04%	100%
15/3/2024	70,33%	22,30%	0,00%	0,00%	7,37%	100%

Fuente: Elaboración propia.

Como resultado del proceso de data cleaning, se obtuvo un archivo operativo, estructurado y coherente con los objetivos del estudio. Esta nueva base permite no solo identificar patrones y relaciones entre viajes troncales y subtroncales, sino también **introducir restricciones reales** derivadas de las condiciones operativas, como la capacidad de carga de cada unidad o el límite temporal entre arribo y distribución.

El trabajo sobre los datos permitió así **alinear la lógica administrativa de registro** con los requerimientos analíticos de la investigación, cumpliendo con el principio fundamental del análisis cuantitativo de *transformar datos en información útil para la toma de decisiones* (Render et al., 2021).

Pronósticos y programación

Una vez estructurada la base de datos, se procedió a la aplicación de modelos de pronóstico con el fin de anticipar la cantidad de viajes troncales esperados en el corto plazo. Esta estimación resulta esencial para la planificación logística, dado que la demanda de subtroncales depende directamente del volumen recibido desde el eje troncal principal.

Según Render et al. (2021), "los modelos de series de tiempo permiten pronosticar valores futuros en función de datos históricos, constituyendo herramientas clave para la toma de decisiones operativas" (p. 234). En línea con esta perspectiva, se utilizaron los registros históricos de viajes troncales para aplicar distintos modelos de proyección y seleccionar el que ofreciera mejor ajuste estadístico.

El objetivo fue estimar la cantidad de viajes troncales que se realizarán en las **dos semanas siguientes**, con el fin de anticipar la demanda de distribución secundaria y definir una configuración eficiente de subtroncales. Se asumió que los troncales operan de lunes a viernes, lo que implica un total de **10 días operativos**.

Para ello, se evaluaron dos enfoques de pronóstico aplicables al tipo de serie disponible:

- **Regresión lineal simple**, orientada a identificar tendencias lineales en el tiempo *(ver Figura 3).*
- **Descomposición multiplicativa**, que permite desagregar los componentes estacionales, tendenciales y cíclicos de la serie *(ver Figura 4).*

Figura 3

Resultados del modelo de Regresión lineal simple.

QM for Windows - [Data] Results

(untitled) Solution

Measure	Value	Future Period	Forecast
Error Measures		307	27.078
Bias (Mean Error)	0	308	27.062
MAD (Mean Absolute Deviation)	6.33	309	27.045
MSE (Mean Squared Error)	101.656	310	27.028
Standard Error (denom=n-2=304)	10.116	311	27.012
MAPE (Mean Absolute Percent Error)	23.398%	312	26.995
Regression line		313	26.979
Demand(y) = 32.17		314	26.962
-.017 * time		315	26.945
Statistics		316	26.929
Correlation coefficient	-.144	317	26.912
Coefficient of determination (r^2)	.021	318	26.896
		319	26.879
		320	26.862

Fuente: Elaboración propia mediante QM for Windows.

Figura 4

Resultados del modelo de descomposición multiplicativa.

QM for Windows - [Data] Results

(untitled) Solution

Measure	Value	Future Period	Unadjusted Forecast	Seasonal Factor	Adjusted Forecast
Error Measures		307	28.265	.691	19.528
Bias (Mean Error)	-1.444	308	28.246	.881	24.89
MAD (Mean Absolute Deviation)	5.535	309	28.227	.881	24.874
MSE (Mean Squared Error)	100.971	310	28.209	.948	26.735
Standard Error (denom=n-2-153=151)	14.304	311	28.19	.821	23.155
MAPE (Mean Absolute Percent Error)	22.261%	312	28.172	.889	25.058
Regression line (unadjusted forecast)		313	28.153	.891	25.084
Demand(y) = 33.954		314	28.135	.829	23.337
-.019 * time		315	28.116	.957	26.909
Statistics		316	28.098	.9	25.288
Correlation coefficient	.54	317	28.079	.841	23.609
Coefficient of determination (r^2)	.292	318	28.061	.909	25.519
		319	28.042	.974	27.312
		320	28.024	.915	25.63

Fuente: Elaboración propia mediante QM for Windows.

Ambos modelos fueron aplicados mediante el software **QM for Windows**, y su desempeño fue evaluado con el criterio del **MAD (desviación absoluta media)** como indicador de precisión. La descomposición multiplicativa resultó ser el modelo con menor MAD, por lo que fue seleccionado como herramienta base para la estimación.

Este modelo permitió pronosticar la cantidad total de troncales previstos para los próximos 10 días hábiles, lo que constituye el insumo principal para calcular las necesidades de distribución secundaria.

La estimación de troncales previstos representa un dato fundamental para diseñar una estrategia logística eficiente. A partir de este resultado, se busca determinar la **combinación óptima de subtroncales** necesarios para distribuir la carga proyectada dentro del plazo operativo establecido.

Tal como señalan Render et al. (2021), *"la programación lineal permite maximizar o minimizar una función objetivo sujeta a restricciones, y es especialmente útil en contextos donde se deben asignar recursos limitados de manera eficiente"* (p. 296). En este caso, el objetivo es optimizar la distribución de la carga troncal estimada, considerando las capacidades físicas de los vehículos, la disponibilidad operativa y la restricción temporal de 72 horas para el despacho.

Una vez obtenido el pronóstico de troncales, se procedió a organizar los datos de subtroncales como insumo para el modelo de optimización *(ver Tabla 1 del Anexo).*

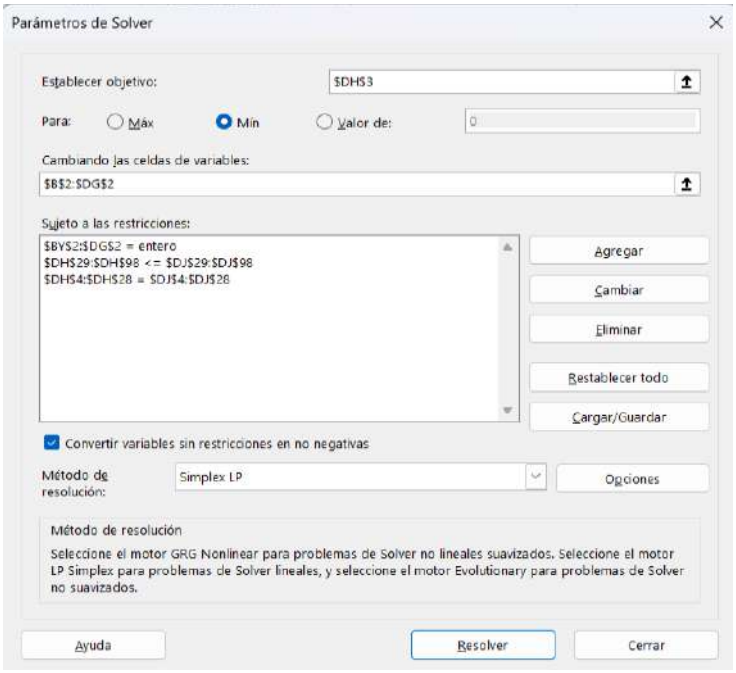
Para ello, se trabajó con los registros históricos agrupados por:

- Día de la semana
- Cantidad de bultos
- Equivalente en pallets o posiciones de carga
- Participación porcentual de cada destino dentro del total

Estos valores permitieron calcular la **demanda promedio por destino**, insumo necesario para formular el modelo de programación lineal. El problema fue planteado como un **modelo de programación lineal entera**, dado que las variables (viajes subtroncales) deben tomar valores enteros en la solución. *(ver Figura 5)*

Figura 5

Configuración del modelo en Solver antes de ejecutar la optimización



Fuente: Elaboración propia con Microsoft Excel Solver.

El modelo fue ejecutado de manera global, considerando todos los subtroncales de manera conjunta. El sistema incluyó:

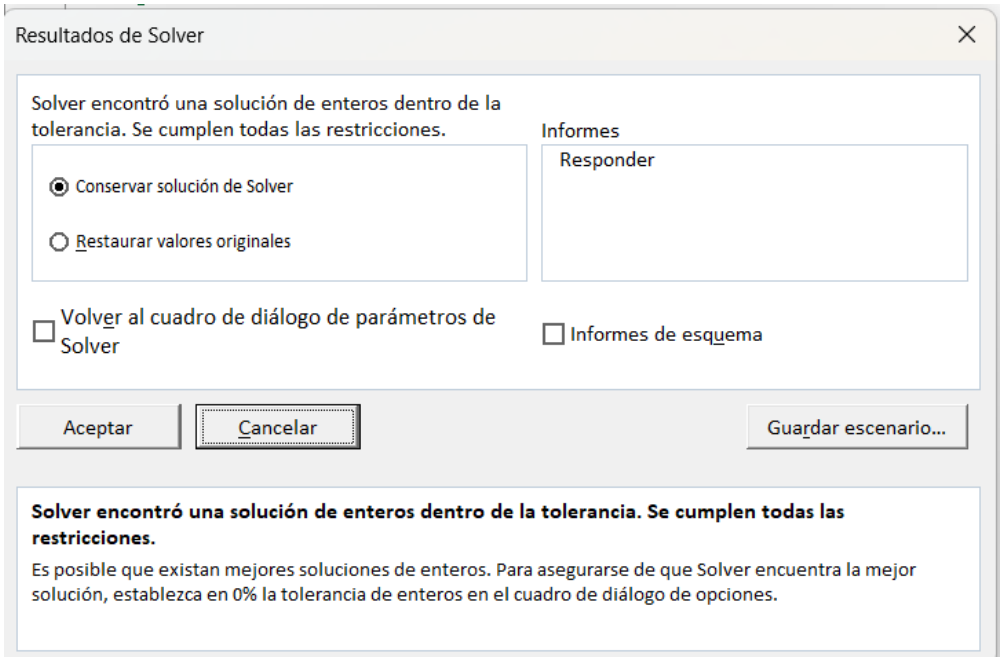
- **110 variables de decisión** (cantidad de viajes por subtroncal por día)
- **93 restricciones** (capacidades, días operativos, límite de carga, etc.)

El sistema logró encontrar una solución óptima que minimiza la cantidad total de viajes subtroncales necesarios para distribuir la carga pronosticada desde los troncales, respetando todas las restricciones operativas impuestas (capacidades máximas, frecuencia operativa, y tiempos de despacho). Como se observa en la Figura 6, la función objetivo alcanzó un valor mínimo de 23, lo cual indica que, bajo las condiciones modeladas, ese es el número óptimo de viajes subtroncales requeridos para cubrir eficientemente la distribución en el período proyectado *(ver Figura 6).*

Figura 6

Solución Óptima

Nombre	Valor original	Valor final
VR	0	23



Fuente: Elaboración propia con Microsoft Excel Solver.

Resultados del modelo de optimización

El modelo asignó valores positivos a 23 variables de decisión, correspondientes a viajes individuales por tipo de unidad y destino, distribuidos a lo largo del horizonte temporal.

El resto de las variables fueron optimizadas en cero, lo que demuestra la capacidad del modelo para **ajustar la asignación de recursos a la demanda real** *(ver Tabla 2 del Anexo).*

La solución obtenida también evidenció que la mayoría de las **restricciones del sistema fueron vinculantes**, lo que significa que se trabajó en los límites operativos, logrando una planificación eficiente pero exigente *(ver Tabla 3 del Anexo).*

Conjunción de análisis y resultados

La conjunción entre el análisis de pronóstico y el modelo de optimización permitió construir un sistema integrado de toma de decisiones logísticas, que parte de la proyección de la cantidad de viajes troncales y deriva en la planificación operativa óptima de los subtroncales.

En primer lugar, la **estimación de la demanda troncal** a través de la descomposición multiplicativa arrojó un volumen proyectado que sirvió de input para definir la carga a distribuir.

En segundo lugar, el modelo de **programación lineal entera** estructuró ese volumen en términos de decisiones concretas: qué unidad utilizar, cuántas veces y hacia qué destino.

El resultado final refleja la posibilidad de **coordinar eficazmente los recursos logísticos** disponibles, respetando tanto las limitaciones de capacidad como los plazos operativos. Además, el proceso permitió identificar qué rutas presentan mayor presión operativa y cuáles disponen aún de márgenes de mejora, aportando insumos útiles para futuras estrategias de rediseño logístico.

Interpretación de resultados

La solución óptima alcanzada por el modelo indica que, bajo las condiciones operativas actuales, **es posible cubrir eficientemente la demanda de distribución secundaria con un total de 23 viajes subtroncales**, a lo largo del horizonte temporal considerado. Este valor representa la **cantidad mínima de salidas logísticas necesarias** para garantizar que toda la carga proyectada sea despachada sin demoras ni sobrepasar las capacidades disponibles.

Cada una de las variables de decisión activas en la solución (es decir, aquellas con valor distinto de cero) representa un viaje subtroncal específico, identificado por tipo de unidad, destino y momento del despacho. Por ejemplo:

- CO Cam SJ 1 = 2 indica que se necesitan 2 camionetas para el subtramo Tucumán–Salta/Jujuy en el primer período.
- CO CLR 5 = 1 señala que se requiere 1 utilitario destinado a Catamarca/La Rioja en el quinto período.
- Variables como CO S i, i+1 o CO LR i, i+2 representan **porciones de carga asignadas con desfasaje temporal**, respetando la restricción de despacho máximo en 72 horas.

La interpretación de estos valores permite visualizar **cómo se distribuye la presión operativa en el tiempo**, qué rutas concentran mayor volumen y cuáles son los días de mayor exigencia. Esta información no solo valida la consistencia del modelo, sino que permite **extraer patrones logísticos relevantes** para la planificación futura.

Además, el análisis del estado de las restricciones muestra que **la mayoría se encuentran en condición "vinculante"**, lo cual implica que el sistema está siendo utilizado al máximo de su capacidad operativa permitida. Esto sugiere un modelo ajustado, eficiente y sin recursos ociosos.

Por otro lado, algunas restricciones no vinculantes presentan **márgenes de mejora potencial**, que podrían ser explorados en escenarios futuros o mediante modelos alternativos más flexibles. Esto abre la puerta a futuras recomendaciones, como la inclusión de modelos multiobjetivo o técnicas de simulación estocástica para incorporar incertidumbre.

En síntesis, el resultado de la optimización no sólo indica **cuántos viajes hacer**, sino también **cuándo hacerlos, con qué unidades y hacia qué destinos**, constituyendo un insumo estratégico de alto valor para la toma de decisiones logísticas. Esto refuerza la idea de que los modelos cuantitativos no sólo sirven para calcular, sino también para pensar estratégicamente la logística desde la eficiencia y la adaptabilidad operativa.

Recomendaciones

Los resultados obtenidos permiten afirmar que el modelo desarrollado es válido y aplicable dentro del contexto operativo actual de Allen Logistics. No obstante, su implementación efectiva requiere de herramientas que faciliten tanto la recolección automatizada de datos como la ejecución recurrente de los modelos de optimización y pronóstico.

En ese sentido, se recomienda considerar la incorporación progresiva de software especializado en gestión y optimización logística, que permitan automatizar las tareas analíticas y facilitar la toma de decisiones operativas. A continuación, se detallan algunas plataformas que podrían adaptarse a las necesidades de la empresa:

- Soluciones de nivel internacional (alta integración y costo medio/alto)

  - SAP Transportation Management (SAP TM): Permite planificar, ejecutar y monitorear operaciones logísticas de punta a punta. Incluye módulos de optimización de rutas y capacidades.

  - Oracle SCM Cloud: Plataforma integral de cadena de suministro que incluye capacidades avanzadas de análisis predictivo y planificación logística.

  - Infor Supply Chain Management: Fuerte en planificación, visibilidad y automatización de decisiones logísticas, utilizada por grandes operadores logísticos.

- Herramientas accesibles o adaptadas a contextos regionales

  - QuadMinds: Plataforma latinoamericana con fuerte presencia en Argentina, especializada en trazabilidad y planificación de rutas de última milla. Muy útil para redes distribuidas como la de Allen Logistics.

- Sistran TMS: Desarrollado en Argentina, ofrece funcionalidades adaptadas a empresas medianas de logística y transporte.
- OpenDoor Logistics (ODL): Software gratuito de código abierto para análisis geográfico y planificación de rutas. Ideal para pequeñas y medianas empresas que buscan optimización sin grandes inversiones.
- Excel + Solver/QM for Windows: Herramientas que, como se demostró en este estudio, permiten implementar modelos efectivos con bajo costo, siempre que se acompañen de capacidad analítica interna.

Asimismo, se sugiere complementar el análisis con modelos alternativos, como:

- Modelos multiobjetivo, que permitan optimizar simultáneamente costos y tiempos de entrega.
- Simulación discreta de eventos, para modelar la operación con incertidumbre y eventos aleatorios.
- Modelos de inventario dinámico, si la empresa desea vincular la logística de transporte con el manejo de stocks.
- Machine learning, en etapas futuras, para realizar predicciones sobre demanda más robustas y adaptativas.

Por último, se recomienda establecer una rutina de actualización y depuración de datos, así como la capacitación progresiva del personal en el uso de herramientas de análisis, lo cual contribuirá a la autonomía operativa y a la sostenibilidad del sistema propuesto.

Para ampliar la información sobre los sistemas mencionados, se incluye en el Anexo una tabla con los principales softwares sugeridos, sus respectivas funcionalidades y enlaces a sus sitios oficiales *(ver Tabla 4 del Anexo).*

Conclusiones

El presente trabajo permitió abordar de manera integral la problemática logística de Allen Logistics, enfocándose en la articulación entre viajes troncales y subtroncales desde una perspectiva cuantitativa. A través del uso de herramientas de pronóstico y programación lineal, se desarrolló un modelo operativo que transforma datos dispersos en decisiones logísticas concretas, con capacidad de aplicación real.

Desde el punto de vista metodológico, se logró **adaptar una base de datos administrativa a una lógica analítica**, estableciendo una unidad de análisis coherente con los objetivos del estudio. La entrevista con el referente logístico de la empresa aportó un marco contextual clave, permitiendo incorporar parámetros operativos reales, tales como tiempos de despacho, capacidades de carga por unidad y asignaciones por destino.

La primera etapa del análisis, centrada en **la proyección de viajes troncales mediante series de tiempo**, permitió anticipar el volumen de carga esperada en el corto plazo. Esto no solo facilitó la planificación operativa, sino que también otorgó robustez al modelo al conectar el diagnóstico con el pronóstico.

A partir de estas proyecciones, se desarrolló un **modelo de programación lineal entera**, que permitió determinar la combinación óptima de subtroncales necesarios para distribuir la carga pronosticada, respetando todas las restricciones operativas establecidas. El modelo alcanzó un valor óptimo de **23 viajes subtroncales**, reflejando una asignación eficiente de recursos logísticos en función de la demanda esperada.

Las variables de decisión activas y el estado de las restricciones evidenciaron que el sistema opera en su mayoría **en condiciones límites**, lo cual confirma que el modelo responde a una lógica de máxima eficiencia sin recursos ociosos. Al mismo tiempo, se identificaron

márgenes de mejora en algunas rutas, lo que podría explorarse mediante enfoques complementarios en futuras implementaciones.

En definitiva, el trabajo demuestra la **utilidad concreta del análisis cuantitativo** como herramienta para resolver problemas logísticos complejos. La articulación entre modelos de pronóstico y optimización posibilita anticipar necesidades, asignar recursos con eficiencia y mejorar la capacidad de respuesta operativa de la empresa.

A su vez, se pone en evidencia la importancia de contar con información confiable, estandarizada y actualizada para sostener la implementación de modelos de este tipo. El camino iniciado en este estudio puede ser replicado y escalado a otras zonas de cobertura, consolidando una estrategia logística basada en datos, modelos y decisiones informadas.

Apéndice

Apéndice A

Entrevista semiestructurada con el encargado del área logística.

1 Podrías explicarnos, a grandes rasgos, ¿cómo funciona la red logística de Allen Logistics?

Claro, mirá... nuestra red tiene una estructura bastante marcada: tenemos los viajes grandes, los de larga distancia, que nosotros llamamos “troncales”, y después están los viajes más chicos, que van a provincias o ciudades más cercanas, que serían los “subtroncales”. La mayoría de la carga se mueve primero en el troncal, y después se reparte por los subtroncales. El más importante es el Buenos Aires–Tucumán. Si ese se retrasa o pasa algo, afecta todo el resto de la operación.

2 ¿Cómo determinan cuándo y cuántos subtroncales programar para despachar la carga?

Mirá, no es algo matemático... Nosotros vamos viendo cómo viene la carga. Si el camión que llega de Buenos Aires viene muy cargado, ya sabemos que vamos a necesitar varios

subtroncales para distribuirla. Si viene con menos, a veces con uno alcanza. No tenemos una fórmula: es mucho de la experiencia de cada día. También depende del destino: por ejemplo, Salta y Jujuy suelen tener más movimiento, así que tratamos de que siempre haya espacio disponible. En otras rutas, como Catamarca o La Rioja, la demanda es más irregular.

3 ¿Tienen algún plazo o tiempo máximo para sacar la carga del depósito después de que llega un troncal?

Y... sí, hay como una "regla de oro": tratamos de que la carga no esté más de 3 días en el depósito. Si pasa más tiempo, ya empezamos a tener problemas: se complica el espacio, los clientes preguntan, y en algunos casos hay penalizaciones por demora. Igual, no es que haya un papel pegado en la pared que diga eso, es más bien algo que todos sabemos que hay que cumplir. Por eso, cuando sabemos que viene el camión de Buenos Aires, ya empezamos a ver qué espacio tenemos para que la carga salga rápido.

4 ¿Cómo es la disponibilidad de los vehículos para los subtroncales?

Bueno, eso es más rígido. Cada ruta tiene sus vehículos asignados. Por ejemplo, para Salta y Jujuy tenemos un camión grande, con 18 posiciones. Para Santiago del Estero usamos tres camionetas, cada una con 3 posiciones, o sea 9 en total. Después, para Catamarca y La Rioja, tenemos un utilitario que hace las dos rutas (compartido) con 8 posiciones. Además, tenemos una camioneta exclusiva para Catamarca (4 posiciones) y otro utilitario para La Rioja (8 posiciones). Eso no lo podemos cambiar: es la flota que tenemos y con la que trabajamos.

5 ¿Cómo manejan las semanas donde hay más carga o donde se demora el troncal?

Ahí se complica. Si el troncal se demora, todo se atrasa. Y si viene más cargado de lo habitual, tenemos que hacer malabares: a veces tenemos que meter más viajes de los subtroncales o esperar a ver si en el siguiente día baja un poco la carga. Como no tenemos un

sistema que nos diga cuántos subtroncales programar según la carga que viene, lo manejamos de manera muy manual, con lo que vamos viendo cada día.

6 ¿Cómo manejan la información en la base de datos? ¿Pueden usarla para planificar?

La base de datos es más bien un registro de lo que ya pasó. Tenemos datos de cada viaje: de dónde a dónde, qué tipo de vehículo, qué día, qué cantidad de carga... pero no está organizada para análisis. Es más un archivo que usamos para liquidar viajes o consultar detalles si alguien pide algo. Si queremos hacer proyecciones o planificar, tenemos que hacerlo a mano, mirando viaje por viaje. No hay un sistema que nos dé alertas o recomendaciones. Sería buenísimo tener algo así, pero hoy no lo tenemos.

Tabla 1

Variables e insumos utilizados en el modelo de optimización

Definición de Variables

Cam SJ i	Cantidad de Camiones que salen al recorrido Tucumán - Salta/Jujuy en el período i
Cam S i	Cantidad de Camionetas que salen al recorrido Tucumán - Santiago del Estero en el período i
Ut CLR i	Cantidad de Utilitarios que salen al recorrido Tucumán - Catamarca/La Rioja en el período i
Cam C i	Cantidad de Camionetas que salen al recorrido Tucumán - Catamarca en el período i
Ut LR i	Cantidad de Utilitarios que salen al recorrido Tucumán - La Rioja en el período i
SJ i, i	Carga destinada al recorrido Tucumán - Salta/Jujuy recibida en el período i, y despachada en el período i
SJ i, i+1	Carga destinada al recorrido Tucumán - Salta/Jujuy recibida en el período i, y despachada en el período i+1
SJ i, i+2	Carga destinada al recorrido Tucumán - Salta/Jujuy recibida en el período i, y despachada en el período i+2
S i, i	Carga destinada al recorrido Tucumán - Santiago del Estero recibida en el período i, y despachada en el período i
S i, i+1	Carga destinada al recorrido Tucumán - Santiago del Estero recibida en el período i, y despachada en el período i+1
S i, i+2	Carga destinada al recorrido Tucumán - Santiago del Estero recibida en el período i, y despachada en el período i+2
CLR i, i	Carga destinada al recorrido Tucumán - Catamarca/La Rioja recibida en el período i, y despachada en el período i
CLR i, i+1	Carga destinada al recorrido Tucumán - Catamarca/La Rioja recibida en el período i, y despachada en el período i+1
CLR i, i+2	Carga destinada al recorrido Tucumán - Catamarca/La Rioja recibida en el período i, y despachada en el período i+2
C i, i	Carga destinada al recorrido Tucumán - Catamarca recibida en el período i, y despachada en el período i
C i, i+1	Carga destinada al recorrido Tucumán - Catamarca recibida en el período i, y despachada en el período i+1
C i, i+2	Carga destinada al recorrido Tucumán - Catamarca recibida en el período i, y despachada en el período i+2
LR i, i	Carga destinada al recorrido Tucumán - La Rioja recibida en el período i, y despachada en el período i

LR i, i+1	Carga destinada al recorrido Tucumán - La Rioja recibida en el período i, y despachada en el período i+1
LR i, i+2	Carga destinada al recorrido Tucumán - La Rioja recibida en el período i, y despachada en el período i+2
CT i	Carga Troncal recibida en depósito en el período i

Restricciones

R1	CT i * 40,35% = [(SJ i, i)+(SJ i, i+1)+(SJ i, i+2)]
R2	CT i * 22,85% = [(S i, i)+(S i, i+1)+(S i, i+2)]
R3	CT i * 13,52% = [(CLR i, i)+(CLR i, i+1)+(CLR i, i+2)]
R4	CT i * 8,02% = [(C i, i)+(C i, i+1)+(C i, i+2)]
R5	CT i * 15,26% = [(LR i, i)+(LR i, i+1)+(LR i, i+2)]
R6	[(SJ i, i) + (SJ i-1, i) + (SJ i-2, i)] ≤ 18*Cam SJ i
R7	[(S i, i) + (S i-1, i) + (S i-2, i)] ≤ 3*Cam S i
R8	[(CLR i, i) + (CLR i-1, i) + (CLR i-2, i)] ≤ 8*Ut CLR i
R9	[(C i, i) + (C i-1, i) + (C i-2, i)] ≤ 18*Cam C i
R10	[(LR i, i) + (LR i-1, i) + (LR i-2, i)] ≤ 8*Ut LR i
R11	Cam SJ i ≤ 1
R12	Cam S i ≤ 3
R13	Ut CLR i ≤ 1
R14	Cam C i ≤ 1
R15	Ut LR i ≤ 1

Función Objetivo (Min Z)

Z = Σ i=1, 14 (CamSJ i + Cam S i + Ut CLR i + Cam C i + Ut LR i)

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2

Variables activas en la solución óptima

Nombre	Valor original	Valor final	Entero
CO SJ 1,1	0	0	Continuar
CO SJ 1,2	2,478314746	11,07255997	Continuar
CO SJ 1,3	0	0	Continuar
CO SJ 2,2	2,478314746	0	Continuar
CO SJ 2,3	0	0	Continuar
CO SJ 2,4	0	12,00735957	Continuar
CO SJ 3,3	0	0	Continuar
CO SJ 3,4	0	0	Continuar
CO SJ 3,5	2,478314746	12,18544002	Continuar
CO SJ 4,4	0	5,210194082	Continuar
CO SJ 4,5	2,478314746	5,81455998	Continuar

CO SJ 4,6	0	0	Continuar
CO SJ 5,5	2,478314746	0	Continuar
CO SJ 5,6	0	0	Continuar
CO SJ 5,7	0	10,65979588	Continuar
CO S 1,1	0	5,250444412	Continuar
CO S 1,2	0	0	Continuar
CO S 1,3	0	1,019890042	Continuar
CO S 2,2	0	6	Continuar
CO S 2,3	0	0,79970672	Continuar
CO S 2,4	0	0	Continuar
CO S 3,3	0	4,180403238	Continuar
CO S 3,4	0	0	Continuar
CO S 3,5	0	2,720149536	Continuar
CO S 4,4	0	0	Continuar
CO S 4,5	0	0	Continuar
CO S 4,6	0	6,243262213	Continuar
CO S 5,5	0	3,279850464	Continuar
CO S 5,6	0	2,756737787	Continuar
CO S 5,7	0	0	Continuar
CO CLR 1,1	0	0	Continuar
CO CLR 1,2	0	0	Continuar
CO CLR 1,3	0	3,710062224	Continuar
CO CLR 2,2	0	0	Continuar
CO CLR 2,3	0	4,023283801	Continuar
CO CLR 2,4	0	0	Continuar
CO CLR 3,3	0	0	Continuar
CO CLR 3,4	0	0	Continuar
CO CLR 3,5	0	4,082952889	Continuar
CO CLR 4,4	0	0	Continuar
CO CLR 4,5	0	0,345288987	Continuar
CO CLR 4,6	0	3,348755001	Continuar
CO CLR 5,5	0	3,571758125	Continuar
CO CLR 5,6	0	0	Continuar
CO CLR 5,7	0	0	Continuar
CO C 1,1	0	0	Continuar
CO C 1,2	0	0	Continuar
CO C 1,3	0	2,200791349	Continuar
CO C 2,2	0	0	Continuar
CO C 2,3	0	2,386592906	Continuar
CO C 2,4	0	0	Continuar
CO C 3,3	0	2,421988326	Continuar
CO C 3,4	0	0	Continuar
CO C 3,5	0	0	Continuar

CO C 4,4	0	0	Continuar
CO C 4,5	0	0	Continuar
CO C 4,6	0	2,191289407	Continuar
CO C 5,5	0	0	Continuar
CO C 5,6	0	2,118750012	Continuar
CO C 5,7	0	0	Continuar
CO LR 1,1	0	0	Continuar
CO LR 1,2	0	4,187540646	Continuar
CO LR 1,3	0	0	Continuar
CO LR 2,2	0	1,350392909	Continuar
CO LR 2,3	0	0	Continuar
CO LR 2,4	0	3,190680376	Continuar
CO LR 3,3	0	0	Continuar
CO LR 3,4	0	4,608421678	Continuar
CO LR 3,5	0	0	Continuar
CO LR 4,4	0	0,200897947	Continuar
CO LR 4,5	0	0	Continuar
CO LR 4,6	0	3,968562945	Continuar
CO LR 5,5	0	0	Continuar
CO LR 5,6	0	4,031437055	Continuar
CO LR 5,7	0	0	Continuar
CO Cam SJ 1	0	0	Entero
CO Cam SJ 2	1	1	Entero
CO Cam SJ 3	0	0	Entero
CO Cam SJ 4	0	1	Entero
CO Cam SJ 5	1	1	Entero
CO Cam SJ 6	0	0	Entero
CO Cam SJ 7	0	1	Entero
CO Cam S 1	0	2	Entero
CO Cam S 2	0	2	Entero
CO Cam S 3	0	2	Entero
CO Cam S 4	0	0	Entero
CO Cam S 5	0	2	Entero
CO Cam S 6	0	3	Entero
CO Cam S 7	0	0	Entero
CO Cam CLR 1	0	0	Entero
CO Cam CLR 2	0	0	Entero
CO Cam CLR 3	0	1	Entero
CO Cam CLR 4	0	0	Entero
CO Cam CLR 5	0	1	Entero
CO Cam CLR 6	0	1	Entero
CO Cam CLR 7	0	0	Entero
CO Cam C 1	0	0	Entero

CO Cam C 2	0	0	Entero
CO Cam C 3	0	1	Entero
CO Cam C 4	0	0	Entero
CO Cam C 5	0	0	Entero
CO Cam C 6	0	1	Entero
CO Cam C 7	0	0	Entero
CO Cam LR 1	0	0	Entero
CO Cam LR 2	0	1	Entero
CO Cam LR 3	0	0	Entero
CO Cam LR 4	0	1	Entero
CO Cam LR 5	0	0	Entero
CO Cam LR 6	0	1	Entero
CO Cam LR 7	0	0	Entero

Fuente: Elaboración propia con Microsoft Excel Solver.

Tabla 3

Resumen de restricciones vinculantes y no vinculantes

Nombre	Valor de la celda	Estado	Demora
R2	0	Vinculante	0
R2	-6,927440034	No vinculante	6,927440034
R2	0	Vinculante	0
R2	-0,782446349	No vinculante	0,782446349
R2	0	Vinculante	0
R2	0	Vinculante	0
R2	-7,340204118	No vinculante	7,340204118
R3	-0,749555588	No vinculante	0,749555588
R3	0	Vinculante	0
R3	0	Vinculante	0
R3	0	Vinculante	0
R3	0	Vinculante	0
R3	0	Vinculante	0
R3	0	Vinculante	0
R4	0	Vinculante	0
R4	0	Vinculante	0
R4	-0,266653975	No vinculante	0,266653975
R4	0	Vinculante	0
R4	0	Vinculante	0
R4	-4,651244999	No vinculante	4,651244999
R4	0	Vinculante	0
R5	0	Vinculante	0
R5	0	Vinculante	0

R5	-10,99062742	No vinculante	10,99062742
R5	0	Vinculante	0
R5	0	Vinculante	0
R5	-13,68996058	No vinculante	13,68996058
R5	0	Vinculante	0
R6	0	Vinculante	0
R6	-2,462066445	No vinculante	2,462066445
R6	0	Vinculante	0
R6	0	Vinculante	0
R6	0	Vinculante	0
R6	0	Vinculante	0
R6	0	Vinculante	0
R7	0	No vinculante	1
R7	1	Vinculante	0
R7	0	No vinculante	1
R7	1	Vinculante	0
R7	1	Vinculante	0
R7	0	No vinculante	1
R7	1	Vinculante	0
R8	2	No vinculante	1
R8	2	No vinculante	1
R8	2	No vinculante	1
R8	0	No vinculante	3
R8	2	No vinculante	1
R8	3	Vinculante	0
R8	0	No vinculante	3
R9	0	No vinculante	1
R9	0	No vinculante	1
R9	1	Vinculante	0
R9	0	No vinculante	1
R9	1	Vinculante	0
R9	1	Vinculante	0
R9	0	No vinculante	1
R10	0	No vinculante	1
R10	0	No vinculante	1
R10	1	Vinculante	0
R10	0	No vinculante	1
R10	0	No vinculante	1
R10	1	Vinculante	0
R10	0	No vinculante	1
R11	0	No vinculante	1
R11	1	Vinculante	0
R11	0	No vinculante	1

R11	1	Vinculante	0
R11	0	No vinculante	1
R11	1	Vinculante	0
R11	0	No vinculante	1
R1	11,07255997	Vinculante	0
R1	12,00735957	Vinculante	0
R1	12,18544002	Vinculante	0
R1	11,02475406	Vinculante	0
R1	10,65979588	Vinculante	0
R2	6,270334454	Vinculante	0
R2	6,79970672	Vinculante	0
R2	6,900552775	Vinculante	0
R2	6,243262213	Vinculante	0
R2	6,03658825	Vinculante	0
R3	3,710062224	Vinculante	0
R3	4,023283801	Vinculante	0
R3	4,082952889	Vinculante	0
R3	3,694043988	Vinculante	0
R3	3,571758125	Vinculante	0
R4	2,200791349	Vinculante	0
R4	2,386592906	Vinculante	0
R4	2,421988326	Vinculante	0
R4	2,191289407	Vinculante	0
R4	2,118750012	Vinculante	0
R5	4,187540646	Vinculante	0
R5	4,541073284	Vinculante	0
R5	4,608421678	Vinculante	0
R5	4,169460892	Vinculante	0
R5	4,031437055	Vinculante	0

Fuente: Elaboración propia con Microsoft Excel Solver.

Tabla 4

Softwares sugeridos

Software	Descripción	Sitio Web
SAP Transportation Management	Plataforma robusta para planificación, ejecución y seguimiento de operaciones logísticas integradas.	https://www.sap.com/products/scm/transportation.html
Oracle SCM Cloud	Suite integral de gestión de cadena de suministro con capacidad predictiva y analítica.	https://www.oracle.com/scm/

Software	Descripción	Sitio Web
Infor Supply Chain	Solución avanzada para automatización, visibilidad y optimización de redes logísticas.	https://www.infor.com/products/supply-chain
QuadMinds	Software argentino con enfoque en trazabilidad, rutas y monitoreo en tiempo real.	https://www.quadminds.com
Sistran TMS	Plataforma desarrollada en Argentina, orientada a operadores logísticos medianos.	https://www.sistran.com/es/soluciones/tms/
OpenDoor Logistics (ODL)	Software gratuito y open source para análisis espacial y optimización de rutas.	https://www.opendoorlogistics.com
QM for Windows	Herramienta educativa y práctica para implementar modelos cuantitativos (utilizada en este trabajo).	https://he.kendallhunt.com/product/qm-windows

Fuente: Elaboración propia

Referencias

- Render, B., Stair, R. M., & Hanna, M. E. (2021). *Análisis Cuantitativo para la toma de decisiones* (13.ª ed.). Pearson.
- Bazaraa, M. S., Jarvis, J. J., & Sherali, H. D. (2010). *Programación lineal y flujos en redes* (4ª ed.). Wiley.
- Box, G. E. P., Jenkins, G. M., & Reinsel, G. C. (2015). *Análisis de series temporales: Pronóstico y control* (5ª ed.). Wiley.
- Chopra, S., & Meindl, P. (2015). *Administración de la cadena de suministro: Estrategia, planeación y operación* (6ª ed.). Pearson.
- Christopher, M. (2016). *Logística y administración de la cadena de suministro* (5ª ed.). Pearson.
- Hyndman, R. J., & Athanasopoulos, G. (2018). *Pronósticos: Principios y práctica* (2ª ed.). OTexts. https://otexts.com/fpp2/

- Appvizer. (s.f.). *Fórmula Wilson: método de cálculo, ejemplo, ventajas e inconvenientes*. Recuperado de https://www.appvizer.es/revista/organizacion-planificacion/cadena-suministro/formula-wilson
- Gerencie.com. (s.f.). *Capacidad ociosa*. Recuperado de https://www.gerencie.com/capacidad-ociosa.html
- QuadMinds. (s.f.). *Tipos de rutas de distribución logística*. Recuperado de https://www.quadminds.com/blog/tipos-de-rutas-de-distribucion/
- UOC. (s.f.). *Introducción a los conceptos básicos de la logística*. Recuperado de https://materials.campus.uoc.edu/daisy/Materials/PID_00154099/pdf/PID_00154095.pdf
- Well Pack. (s.f.). *Cómo calcular la capacidad de un camión*. Recuperado de https://wellpack.org/es/como-calcular-la-capacidad-de-un-camion/