

Optimizing food distribution in Villa El Salvador's community kitchens using binary integer programming and vehicle routing CVRP

Modesto-Romero, Bryan ¹ , Quintana-Macukachi, Abraham ¹ , Vergara-Cordova, Jhon ¹ ,

Ninaquispe-Soto, Mario ^{1,2} 

¹Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur, UNTELS, Lima, Perú, 2313010746@untels.edu.pe, 2223010215@untels.edu.pe, 2313110074@untels.edu.pe

²Universidad Privada del Norte, UPN, Lima, Perú. mninaquispe@untels.edu.pe

Abstract- *This research focuses on improving food supply logistics through mathematical programming applied to community kitchens in Villa El Salvador, applying Binary linear programming and vehicle routing techniques (CVRP). The main objective is to improve distribution efficiency, reducing distances, delivery times and maximizing the use of available resources. Two complementary mathematical models were developed. The first one, implemented in PYTHON, allows to optimally assign the 150 canteens to one of the eight distribution centers (DC), considering the distances and the service capacity of each DC. The second model, implemented in Python with ORS and Pulp CBC, generates efficient daily delivery routes, considering that each truck has a capacity of 2 tons and a maximum working day of 8 hours. The model simulates multiple trips per truck returning to the distribution center for reloading. Since it is a single monthly delivery per canteen, the results obtained allow planning in advance the necessary delivery days, guaranteeing the fulfillment of demand without exceeding logistical capacities. The results show that Model 1 assigned all 150 community kitchens to the 8 distribution centers, covering 100% of demand with a total accumulated distance of 141.36 km. Model 2 generated 30 optimized routes with a total distance of 106.12 km and 87.57 effective working hours, equivalent to approximately 11 working days. These results confirm that the proposed approach is operationally viable, improves equity in food distribution, and has the potential to scale to the full 242 community kitchens in the district, strengthening food security for vulnerable urban populations.*

Keywords-- *Food distribution optimization, Linear programming, Transportation cost minimization, Urban logistics.*

Optimización del reparto de alimentos en comedores populares de Villa El Salvador mediante programación entera binaria y ruteo vehicular (CVRP)

Modesto-Romero, Bryan ¹ , Quintana-Macukachi, Abraham ¹ , Vergara-Cordova, Jhon ¹ ,

Ninaquispe-Soto, Mario ^{1,2} 

¹Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur, UNTELS, Lima, Perú, 2313010746@untels.edu.pe, 2223010215@untels.edu.pe, 2313110074@untels.edu.pe

²Universidad Privada del Norte, UPN, Lima, Perú. mninaquispe@untels.edu.pe

Resumen– Esta investigación se centra en mejorar la logística del suministro de alimentos mediante programación matemática aplicada a comedores comunitarios en Villa El Salvador, aplicando programación lineal binaria y técnicas de ruteo de vehículos (CVRP). El objetivo principal es mejorar la eficiencia de la distribución, reduciendo distancias y tiempos de entrega, y maximizando el uso de los recursos disponibles. Se desarrollaron dos modelos matemáticos. El primero, implementado en Python, permite asignar óptimamente los 150 comedores a uno de los 8 centros de distribución (CD), considerando las distancias y la capacidad de servicio de cada uno. El segundo modelo, implementado en Python con ORS y Pulp CBC, genera rutas de entrega diarias eficientes, considerando que cada camión tiene una capacidad de 2 toneladas y una jornada laboral máxima de 8 horas. Dado que cada comedor requiere una cantidad definida por el número de beneficiarios, el modelo simula múltiples viajes por camión, cada uno con retorno al centro de distribución para recarga. Al tratarse de una única entrega mensual por comedor, los resultados obtenidos permiten planificar con antelación los días de entrega necesarios, garantizando así el cumplimiento de la demanda sin exceder la capacidad logística. Los resultados muestran que el Modelo 1 asignó los 150 comedores a 8 centros de distribución cubriendo el 100% de la demanda, con una distancia total de 141.36 km. El Modelo 2 generó 30 rutas con 106.12 km y aproximadamente 11 jornadas laborales de trabajo efectivo, demostrando la viabilidad operativa y el alto potencial de escalabilidad del modelo.

Palabras clave-- Optimización de distribución de alimento, Programación lineal, Costo mínimo de transporte, Logística urbana.

I. INTRODUCCIÓN

El reparto de alimentos a comedores populares representa un componente esencial para garantizar la seguridad alimentaria de poblaciones vulnerables en el distrito de Villa El Salvador. Actualmente, existen 242 comedores populares que reciben mensualmente productos alimenticios desde centros de distribución (CD) gestionados por la Municipalidad. Sin embargo, el modelo vigente no contempla

una red de reparto estructurada: son los propios responsables de cada comedor quienes deben acudir a los centros de distribución para recoger los alimentos. Esta situación genera múltiples complicaciones, especialmente logísticas, que afectan a los comedores más alejados o con menos recursos de transporte, problemática que coincide con lo señalado por [1], [2], quienes evidencian que la ausencia de modelos logísticos optimizados incrementa desigualdades y costos operativos. Asimismo, la importancia de una organización territorial adecuada y de la coordinación comunitaria para mejorar la seguridad alimentaria ha sido respaldada por investigaciones recientes [3], al igual que la necesidad de fortalecer los vínculos entre instituciones y organizaciones locales para aumentar la resiliencia del sistema alimentario [4]. En este contexto, se hace necesario proponer soluciones que optimicen el proceso de entrega y alivien las cargas operativas de quienes gestionan estos espacios comunitarios.

La investigación operativa, respaldada por estudios contemporáneos sobre distribución eficiente de insumos, se consolida como una herramienta clave para mejorar la eficiencia logística en la distribución de alimentos. Por ejemplo, en el contexto de bienes perecibles y distribución de productos agrícolas, un modelo de ruteo vehicular integrado ha demostrado reducir costos de distribución en un 19 % y ahorro de combustible de 24 % al optimizar rutas en una cadena minorista [5]. También, en contextos de distribución de alimentos frescos bajo ventanas de tiempo, un enfoque de optimización de rutas que considera tanto la ubicación de almacenes como la planificación de rutas ha probado mejorar la eficiencia logística y reducir tiempos de entrega [6]. Más aún, modelos de ruteo con demanda y tiempos de servicio estocásticos han sido recientemente desarrollados para operaciones de bancos de alimentos, lo que permite planificar rutas robustas frente a incertidumbres en la demanda o en tiempos de carga/descarga [7]. Por tanto en línea con estos aportes en el presente estudio se aplica un modelo de programación entera binaria / ruteo vehicular (CVRP) adaptado al contexto de comedores populares en Villa El

Salvador: con restricciones reales sobre la capacidad de los vehículos (dos toneladas), el volumen promedio requerido por comedor (aproximadamente 400 kg) y tiempos de carga, descarga y retorno. Con ello, se plantea optimizar la asignación entre centros de distribución y comedores y minimizar las distancias de recorrido, buscando al mismo tiempo una distribución equitativa y eficiente de los recursos.

Dado que modelar la totalidad de los 242 comedores y los ocho centros de distribución resulta complejo en una primera etapa, se decidió trabajar con una muestra estadísticamente representativa al 95% de nivel de confiabilidad teniendo aproximadamente 150 comedores, calculada mediante procedimientos estándar para poblaciones finitas y determinación de tamaño muestral[8]. No obstante, se incluyeron los ocho centros de distribución en su totalidad, dado que constituyen los nodos estructurales del sistema logístico y su incorporación completa incrementa la validez del análisis. Con esta configuración, se desarrollaron dos modelos matemáticos complementarios: el primero, implementado en Python mediante programación entera binaria, optimizó la asignación de comedores a centros de distribución; y el segundo, desarrollado con Google OR-Tools siguiendo el enfoque del Capacitated Vehicle Routing Problem (CVRP), generó rutas óptimas de entrega considerando restricciones reales como capacidad vehicular, demanda por comedor y tiempos operativos. Este enfoque se alinea con aplicaciones recientes del VRP en sistemas de distribución y reparto urbano [9], lo que permite validar la eficiencia del modelo y evaluar su escalabilidad hacia la totalidad del sistema distrital

El objetivo principal de este estudio es aplicar técnicas de investigación operativa para mejorar la eficiencia del proceso de distribución de alimentos en los comedores populares del distrito de Villa El Salvador. Los objetivos específicos abarcan: (a) determinar la asignación óptima de comedores a centros de distribución mediante programación entera binaria; (b) diseñar rutas logísticas eficientes utilizando modelos de ruteo de vehículos; (c) estimar el número de viajes requeridos por camión considerando una jornada laboral de ocho horas; y (d) validar el desempeño del modelo propuesto a partir de una muestra representativa de comedores. La justificación de este trabajo se sustenta en la necesidad de aportar una solución práctica, económica y sostenible que permita a la Municipalidad implementar un sistema de reparto directo, eficiente y equitativo. En esa línea, la pregunta de investigación que orienta este estudio es: ¿Cómo pueden la programación entera binaria y el ruteo de vehículos optimizar el reparto mensual de alimentos hacia los comedores populares, reduciendo tiempos de entrega y mejorando la cobertura en el distrito de Villa El Salvador?

II. METODOLOGÍA

En esta investigación se usa un enfoque cuantitativo y aplicado para analizar cómo optimizar la distribución de alimentos hacia los comedores populares de Villa El Salvador. La idea es apoyarse en métodos matemáticos que ya se han trabajado en estudios recientes sobre programación entera y modelos de optimización aplicados a redes sociales y a sistemas de asistencia alimentaria [10]. Con eso se plantea un modelo que permita definir bien las variables de decisión, tomando en cuenta aspectos como la demanda de cada comedor, la capacidad operativa de los centros de distribución, la disponibilidad de vehículos y la forma en la que está distribuido el territorio. La función objetivo busca, sobre todo, reducir la distancia total que recorren las unidades y lograr que el reparto sea lo más eficiente posible. Gracias a que las restricciones logísticas son lineales, es posible aplicar métodos exactos de optimización que ayudan a obtener soluciones óptimas incluso en escenarios de distribución social que pueden resultar bastante complejos [11].

En este estudio también se realiza un análisis de sensibilidad para evaluar cómo los cambios en las restricciones operativas, como variaciones en la capacidad de carga, los tiempos de servicio o la disponibilidad de vehículos, pueden influir en la eficiencia del sistema de distribución. Este tipo de análisis ya ha sido aplicado y validado en investigaciones sobre optimización logística urbana y abastecimiento comunitario, lo que permite comprobar que el modelo se mantiene estable y pueda adaptarse a diferentes condiciones operativas [12]. Además, se utiliza un análisis matemático descriptivo que ayuda a justificar decisiones estratégicas relacionadas con la asignación de comedores, el uso de capacidad en cada centro y la planificación de rutas. Para facilitar el manejo de la información, los datos principales como la ubicación geográfica, la demanda mensual, los tiempos de operación y las capacidades se organizan en hojas de cálculo para que su interpretación y validación sea más sencilla.

Los pasos de esta investigación se desarrollan de la siguiente manera:

- **Recolección de datos:** Primero se juntan las direcciones, las demandas mensuales y las características operativas de los comedores populares del distrito. También se registra la ubicación y la capacidad de los centros de distribución, usando la información brindada por la Sub Gerencia de Programas Sociales de la Municipalidad de Villa El Salvador.
- **Formulación del modelo matemático:** Luego se definen las variables de decisión, los parámetros y las restricciones principales. Con eso se arma un modelo de programación entera binaria para asignar cada comedor a un solo centro de distribución, y también un modelo de ruteo vehicular capacitado (CVRP) para planificar rutas óptimas teniendo en cuenta las capacidades, las distancias y los tiempos de operación.
- **Resolución del modelo:** Finalmente, los modelos se resuelven con Google OR-Tools, aplicando algoritmos especializados tanto para la parte de asignación como para el

ruteo. Después se revisan los resultados para comprobar que las distancias sean coherentes y que las rutas propuestas sean operativamente viables.

- Interpretación y recomendaciones: Se analizarán los resultados obtenidos y se propondrán mejoras estratégicas para el proceso logístico, como redistribución de cargas, ajustes en las rutas y reorganización de centros de distribución, orientadas a lograr una entrega más eficiente y equitativa de alimentos.

A. Recolección de datos

Los datos que aparecen en las presentes tablas fueron proporcionados por la Sub Gerencia de Programas Sociales Municipalidad Villa El Salvador siendo utilizados para hallar la latitud y longitud de los comedores y CD.

A fin de sintetizar los datos de los 150 comedores se realizó en la Tabla 2 un resumen estadístico de los requerimientos en Kg.

TABLA I

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE REQUERIMIENTO DE LOS COMEDORES.

Métrica	Valor
Total de Comedores	150
Demanda mínima (kg)	201
Demanda máxima (kg)	465
Demanda promedio (kg)	333.54
Desviación estándar (kg)	86.98
Demanda total (kg)	50 031

Los datos que aparecen en las presentes tablas fueron proporcionados por la Sub Gerencia de Programas Sociales Municipalidad Villa El Salvador siendo utilizados para hallar la latitud y longitud de los comedores y CD.

B. Formulación del modelo matemático

Para facilitar una visualización clara y concisa, la formulación matemática se presentará utilizando un modelo compacto.

Sean los modelos:

1) Modelo 1

Este modelo fue formulado para optimizar la asignación de comedores populares a los CD, minimizando las distancias de transporte bajo la restricción de capacidad logística de cada centro en base a las restricciones de asignación y capacidad máxima.

Parámetros:

Ki: Requerimientos de alimentos del comedor i

Cj: Capacidad máxima del CD

dij: Distancia del comedor i al centro j

Variables decisión:

xij : Variable binaria que toma el valor 1 si es comedor "i" es asignado al centro de distribución "j"; y 0 en caso no lo tome.

Donde:

i= 1,2,3,...,150 siendo los comedores populares.

j= 1,2,3,4,5,6,7,8 siendo los centros de distribución en la muestra.

Función Objetivo:
$$\text{Minimizar } Z = \sum_{i=1}^{150} \sum_{j=1}^8 d_{ij} \cdot x_{ij}$$

Sujeto a:

Asignación Única:
$$\sum_{j=1}^8 x_{ij} = 1 \quad \forall i = 1, 2, \dots, 150$$

Capacidad Máxima por centro:

$$\sum_{i=1}^{150} K_i x_{ij} \leq C_j \quad \forall j = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8$$

Variable Binaria:

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i = 1, \dots, 150, j = 1, \dots, 8$$

2) Modelo 2

El Modelo 2 fue resuelto mediante un enfoque mixto. Para la mayoría de los centros de distribución, el problema se abordó utilizando el modelo determinista mediante programación entera, dado que los tiempos computacionales resultaron manejables. Sin embargo, en dos centros de distribución específicos, donde el tamaño del problema incrementó significativamente la complejidad y el tiempo de cómputo, se empleó un enfoque heurístico.

En estos casos, se utilizó la librería OR-Tools de Google, implementando una heurística constructiva de tipo voraz basada en la estrategia Path Cheapest Arc para la generación de rutas factibles. Cada ruta se interpretó como un viaje realizado de manera secuencial por un único vehículo de distribución, priorizando la obtención de soluciones operativamente viables.

Esta estrategia permitió equilibrar la precisión del modelo con la escalabilidad del método heurístico en casos de mayor complejidad.

Parámetros:

N = {0, 1, 2, ..., n}: Conjunto de nodos donde 0 representa el Centro de Distribución

qi: Demanda del nodo i en kilogramos

$$K = \left\lceil \frac{\sum_{i=1}^n q_i}{Q} \right\rceil$$
 : Cantidad de vehículos disponibles

T_{max} : Tiempo máximo permitido por jornada laboral = 8 horas

Q: Capacidad Máxima del camión = 2000kg

d_{ij} : Distancia entre los nodos

Variables decisión:

$$x_{ij}^k \in \{0, 1\} \text{ para } i, j \in N, i \neq j, k = 1, \dots, K$$

$$x_{ij}^k = \{1 \text{ si en el viaje } k \text{ viaja de } i \text{ a } j, 0 \text{ en caso contrario}\}$$

$$u_i^k \in [0, Q] \text{ para } i \in N \setminus \{0\}, k = 1, \dots, K: \text{Carga acumulada al llegar al nodo } i \text{ en el viaje } k$$

Función Objetivo: Minimizar

$$Z = \sum_{k=1}^K \sum_{i \in N} \sum_{j \in N, j \neq i} d_{ij} \cdot x_{ij}^k$$

Esta función objetivo está sujeta a las siguientes restricciones las cuales fueron tomadas de los datos recopilados y calculados.

Cada comedor es visitado exactamente una vez

$$\sum_{k=1}^K \sum_{j \in N, j \neq i} x_{ij}^k = 1 \quad \forall i \in N \setminus \{0\}$$

Subtour elimination MTZ

$$u_i^k - u_j^k + Q \cdot x_{ij}^k \leq Q - q_j \quad \forall i, j \in N, i \neq j, i \neq 0,$$

Carga del vehículo al llegar al nodo

$$q_i \leq u_i^k \leq Q \quad \forall i \in N, i \neq 0$$

Salida y retorno del depósito

$$\sum_{j \in N, j \neq 0} x_{0j}^k \leq 1 \quad \sum_{i \in N, i \neq 0} x_{i0}^k \leq 1$$

Variable Binaria de decisión:

Variables solo pueden tomar valores 1 o 0

$$x_{ij}^k \in \{0, 1\} \quad u_i^k \in [0, Q].$$

III. RESULTADOS

Durante el proceso de recolección de datos, se obtuvieron las direcciones de los comedores populares y centros de distribución que fueron transformados a coordenadas mediante el aplicativo Geodir, igualmente se obtuvieron los requerimientos de los comedores en kg y capacidades de centro de distribución. Se cuenta con disposición de 1 camión con capacidad de 2 toneladas.

En base a la propuesta que se ha dado en la función objetivo 1 y 2 se usó el lenguaje Python Versión 3.13.3 con el compilador Visual Studio utilizando la API de ORS obteniendo rutas más exactas y el uso de librerías como Pulp CBC además de utilizar heurística en partes del modelo 2.

A. Resultado Modelo 1



Fig. 1 Mapa de asignación de comedores populares obtenidos en el código del modelo 1.

TABLA II
RESULTADO DEL MODELO 1

CD	Nº Comedores Asignados	Cap.Total	Cap. Usada	Dist. Total
CD1	16	9042	5519	17.52
CD2	17	6036	5970	15.61
CD3	31	11411	10029	31.13
CD4	21	6978	6790	19.58
CD5	9	3571	3245	6.88
CD6	29	10541	10292	23.66
CD7	23	12613	7192	23.6
CD8	4	19599	994	3.38

En la Fig 1 se muestra gráficamente las ubicaciones y asignación de los Comedores y CD en el mapa de V.E.S

En la Tabla 2 la configuración de los CD repartidos que es usada para optimizar la asignación de comedores a los centros de distribución más cercanos, incluyendo datos como las distancias, las capacidades de los CD y los requerimientos totales siendo utilizado para el modelo 2.

B. Resultado Modelo 2

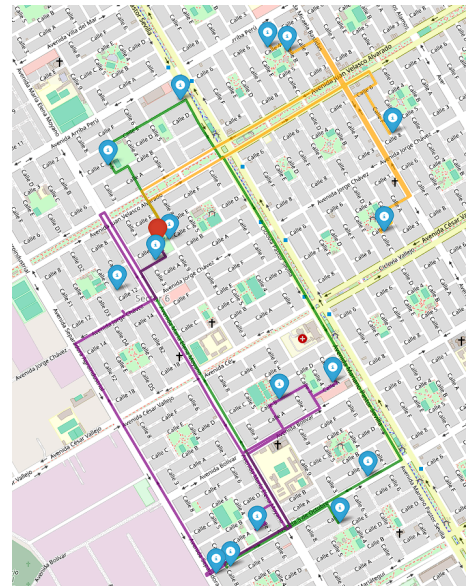


Fig. 2 Datos obtenidos de manera gráfica del modelo 2 del CD1.

TABLA III

RESULTADO DEL MODELO 2

CD	Total Rutas	Distancia total(m)	Tiempo total (s)
CD1	3	16 083	30 767
CD2	4	12 619	32 315
CD3	6	11 496	67 800
CD4	4	18 852	48 887
CD5	2	5 030	9286
CD6	6	10 856	64 260
CD7	4	27 300	52 486
CD8	1	3 884	9 443
Total	-	106 120	315 244

En la tabla 4 de asignaciones se puede observar el desempeño operativo de los ocho CD, evidenciando el número de rutas generadas, la distancia total recorrida y el tiempo acumulado de operación. En cuanto al tiempo operativo, los CD sumaron un total de 315 244 segundos, lo cual representa una carga operativa distribuida adecuadamente entre los ocho CD.

Igualmente en el análisis consolidado se obtuvo la distancia total de 106.12 Km recorridos, el tiempo total de 87.57 horas de trabajo efectivo, considerando las 8 horas laborales siendo aproximadamente 11 días de trabajo lo cual refleja el esfuerzo operativo total obtenido a través del procesamiento de cada CD de manera independiente teniendo una visión clara y unificada de resultados.

Los resultados obtenidos permiten evidenciar, desde un enfoque cuantitativo y técnico, que la solución propuesta no sólo es operativamente viable, sino también cercana a condiciones de eficiencia óptima bajo las restricciones planteadas. En particular, la reducción de la distancia total recorrida (106.12 km) y la estructuración de 30 rutas para atender 150 comedores reflejan una adecuada explotación de la capacidad vehicular (2 toneladas) y una asignación balanceada de la demanda entre los centros de distribución, lo cual es consistente con propiedades teóricas del CVRP en escenarios con capacidad limitada. Asimismo, el tiempo total estimado de operación (87.57 horas) distribuido en aproximadamente 11 jornadas laborales evidencia una planificación factible dentro de las restricciones temporales, evitando sobrecargas operativas. Desde una perspectiva analítica, la combinación de un modelo exacto para la asignación y un enfoque heurístico para el ruteo permite alcanzar soluciones de alta calidad en tiempos computacionales razonables, lo cual es especialmente relevante en problemas NP-hard como el CVRP. Adicionalmente, el comportamiento observado en la utilización de capacidades (por ejemplo, centros con holguras como el CD8 frente a otros más exigidos como CD3 o CD6) sugiere oportunidades de mejora mediante técnicas de balanceo de carga o incorporación de múltiples vehículos, lo que podría reducir aún más la longitud de las rutas y el tiempo total de operación. En conjunto, estos resultados no solo validan la consistencia interna del modelo, sino que también

demuestran su potencial como herramienta robusta para la toma de decisiones en sistemas logísticos urbanos con restricciones reales.

IV. DISCUSIONES

A. Comparación de resultados con trabajos relacionados

Los resultados obtenidos en esta investigación muestran mejoras significativas en la eficiencia del reparto de alimentos, lo cual es consistente con estudios recientes sobre optimización logística. Por ejemplo, el trabajo de [13] demuestra que los modelos CVRP con múltiples restricciones permiten reducir tiempos y mejorar el uso de capacidad en sistemas de transporte multimodal, lo que coincide con la reducción de distancias y la mejor organización operativa lograda en nuestras rutas.

En relación con trabajos previos, [14] señalan que los modelos integrados de redes logísticas permiten distribuir mejor la carga entre los almacenes y disminuir los costos operativos. Esto coincide con lo que ocurre en nuestro estudio al usar programación entera binaria para asignar de manera óptima los comedores a los centros de distribución.

Además, [15] destacan que incorporar ventanas de tiempo y restricciones operativas en sistemas de respuesta de emergencia hace que las rutas generadas sean mucho más aplicables en la realidad. Este hallazgo refuerza la necesidad de incluir en el modelo factores como los tiempos de carga y descarga, así como la jornada máxima laboral, ya que estos elementos fueron clave para obtener rutas factibles dentro del contexto municipal.

Por último [16] demuestran que los modelos de ruteo robustos resultan especialmente útiles en escenarios humanitarios, donde la demanda y los tiempos de viaje pueden variar bastante. Aunque en este estudio se trabajó con un enfoque determinista, sus conclusiones coinciden con las nuestras en que la optimización matemática contribuye a mejorar la cobertura y a reducir el esfuerzo logístico en poblaciones vulnerables.

B. Implicaciones obtenidas del modelo

El modelo propuesto contribuye a mejorar la organización del proceso de distribución de alimentos buscando minimizar la distancia total recorrida, estructurando rutas de reparto de manera sistemática. Esto no solo permite utilizar de manera más eficiente los recursos logísticos disponibles sino que facilita una planificación y supervisión de las actividades de distribución por parte de las autoridades responsables.

C. Limitaciones del modelo

Dentro del modelo se presentan limitaciones inherentes a los supuestos que se adoptó y al uso de las herramientas como la distancia y tiempos de recorrido que fueron estimados mediante el API OpenRouteService, la cual nos brinda una representación detallada de la red vial, no obstante las estimaciones corresponden a condiciones cuasi estáticas ya que no influye el tráfico, las ventanas horarias ni sucesos imprevistos en las estimaciones, lo cual puede generar

diferencias entre el tiempo de las rutas obtenidas y las condiciones reales de operación.

Igualmente dentro del análisis se desarrolló mediante un enfoque determinista y considerando un único vehículo de distribución. En el caso del segundo modelo se empleó la heurística para obtener soluciones factibles en un tiempo computacional razonable lo cual no garantizan optimalidad, debido a esto la decisión metodológica limita la generalización de los resultados a escenarios logísticos de mayor complejidad.

Los resultados obtenidos evidencian que la integración de modelos de programación entera binaria con enfoques de ruteo vehicular capacitado (CVRP) no solo mejora la eficiencia operativa, sino también contribuye a una asignación más equitativa de recursos en contextos de logística social. En particular, la reducción de distancias y la adecuada distribución de cargas entre centros de distribución se alinean con lo reportado por Reusken et al., quienes destacan que la optimización de redes en bancos de alimentos permite maximizar el alcance del servicio bajo restricciones de capacidad [1]. Asimismo, estudios recientes sobre ruteo con incertidumbre en demanda y tiempos de servicio demuestran que la incorporación de modelos más robustos pueden incrementar significativamente la resiliencia del sistema logístico frente a variabilidad operativa [7]. En este sentido, aunque el presente estudio adopta un enfoque determinista, sus resultados son consistentes con investigaciones que señalan que incluso modelos simplificados pueden generar mejoras sustanciales en costos y tiempos en sistemas humanitarios [11]. De igual forma, la eficiencia observada en la planificación de rutas coincide con lo reportado por Wang et al., quienes evidencian que la optimización de rutas en distribución de alimentos frescos reduce significativamente los tiempos de entrega y mejora la utilización de recursos [6]. Por tanto, los hallazgos no solo validan la aplicabilidad del enfoque propuesto, sino que también refuerzan la relevancia de la investigación operativa como herramienta estratégica para fortalecer sistemas de distribución alimentaria en contextos urbanos vulnerables.

V. CONCLUSIONES

El uso de los modelos de programación entera binaria y del ruteo vehicular tuvo un impacto importante en la mejora del sistema de distribución de alimentos para los comedores populares de Villa El Salvador. Gracias al primer modelo se pudo asignar cada comedor a un centro de distribución de manera ordenada y realista, evitando sobrecargar algún punto y logrando que las distancias recorridas fueran menores. En cuanto al modelo de ruteo (CVRP), este permitió planificar rutas que se ajustaran a las condiciones reales del distrito. Al considerar las limitaciones de carga, el tiempo disponible de trabajo y la operación del único camión, se pudieron generar

recorridos más prácticos y eficientes, lo que facilita bastante el proceso de reparto.

Los resultados demuestran que la optimización matemática es una herramienta útil para planificar la logística municipal, ya que permite reducir tiempos, mejorar la cobertura del servicio y distribuir mejor los recursos. Además, los modelos desarrollados pueden ampliarse para incluir más vehículos, considerar escenarios con mayor demanda o aplicarse a otros distritos. En conjunto, este estudio evidencia que un sistema de reparto estructurado y apoyado en modelos matemáticos puede mejorar la gestión operativa y fortalecer la atención alimentaria a poblaciones vulnerables.

En complemento a los hallazgos presentados, se concluye que la implementación de modelos híbridos de optimización constituye una estrategia altamente efectiva para la toma de decisiones en sistemas logísticos, especialmente en problemas sociales, en escenarios con restricciones operativas y recursos limitados. La evidencia empírica obtenida demuestra que la combinación de técnicas exactas y heurísticas permite alcanzar soluciones cercanas al óptimo con tiempos computacionales razonables, lo cual es clave para su aplicabilidad en entornos reales. Asimismo, el enfoque metodológico adoptado no solo optimiza indicadores tradicionales como distancia y tiempo, sino que también genera valor social al mejorar la accesibilidad y equidad en la distribución de alimentos. Desde una perspectiva científica, el estudio aporta una base sólida para futuras investigaciones orientadas a la incorporación de incertidumbre, múltiples vehículos y variables dinámicas como el tráfico urbano. En ese sentido, se establece que la escalabilidad y adaptabilidad del modelo representan líneas prometedoras para su replicabilidad en otros distritos o programas sociales, consolidando así el rol de la optimización matemática como soporte fundamental en la gestión eficiente de sistemas de asistencia alimentaria.

Como trabajo futuro, se propone integrar fuentes de información de tráfico dinámico o modelos dependientes del tiempo que permitan capturar variaciones horarias y eventos imprevistos, con el fin de mejorar la robustez de las rutas obtenidas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo institucional brindado para la participación en LACCEI 2026.

REFERENCES

- [1] M. Reusken, F. Cruijssen, and H. Fleuren, "A food bank supply chain model: Optimizing investments to maximize food assistance," *Int J Prod Econ*, vol. 261, p. 108886, Jul. 2023, doi: 10.1016/j.ijpe.2023.108886.
- [2] A. Esmailidouki, M. Rambe, A. Ardestani-Jaafari, E. Li, and B. Marcolin, "Food bank operations: review of operation research methods and challenges during COVID-19," *BMC Public Health*, vol. 23, no. 1, p. 1783, Sep. 2023, doi: 10.1186/s12889-023-16269-4.
- [3] K. Garrity et al., "Local Food System Approaches to Address Food and Nutrition Security among Low-Income Populations: A Systematic Review," *Advances in Nutrition*, vol. 15, no. 4, p. 100156, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.advnut.2023.100156.

- [4] C. Verfuërth, A. Sanderson Bellamy, B. Adlerova, and A. Dutton, "Building relationships back into the food system: addressing food insecurity and food well-being," *Front Sustain Food Syst*, vol. 7, Jul. 2023, doi: 10.3389/fsufs.2023.1218299.
- [5] W. M. Fernando, A. Thibbotuwawa, H. N. Perera, P. Nielsen, and D. K. Kilic, "An integrated vehicle routing model to optimize agricultural products distribution in retail chains," *Cleaner Logistics and Supply Chain*, vol. 10, p. 100137, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.clsen.2023.100137.
- [6] Y. Wang, Y. Wang, and J. Leng, "A Study on the Vehicle Routing Planning Method for Fresh Food Distribution," *Applied Sciences*, vol. 14, no. 22, p. 10499, Nov. 2024, doi: 10.3390/app142210499.
- [7] M. Reusken, G. Laporte, S. U. K. Rohmer, and F. Cruijsen, "Vehicle routing with stochastic demand, service and waiting times — The case of food bank collection problems," *Eur J Oper Res*, vol. 317, no. 1, pp. 111–127, Aug. 2024, doi: 10.1016/j.ejor.2024.03.031.
- [8] S. K. Ahmed, "How to choose a sampling technique and determine sample size for research: A simplified guide for researchers," *Oral Oncology Reports*, vol. 12, p. 100662, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.oor.2024.100662.
- [9] T. Dollevoet and R. Spliet, "Preprocessing to Reduce Vehicle Capacity for Routing Problems," *Operations Research Forum*, vol. 4, no. 2, p. 42, May 2023, doi: 10.1007/s43069-023-00220-9.
- [10] J. Chaab and G. Zaccour, "Dynamic pricing in the presence of social externalities and reference-price effect," *Omega (Westport)*, vol. 122, p. 102963, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.omega.2023.102963.
- [11] R. Bonku, F. Alkaabneh, and L. B. Davis, "Collaborative vehicle routing for equitable and effective food allocation in nonprofit settings," *Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management*, vol. 15, no. 2, pp. 135–153, Apr. 2025, doi: 10.1108/JHLSCM-11-2023-0113.
- [12] J. Zhang, Y.-E. Ge, C. Tang, and M. Zhong, "Optimising modular-autonomous-vehicle transit service employing coupling–decoupling operations plus skip-stop strategy," *Transp Res E Logist Transp Rev*, vol. 184, p. 103450, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.tre.2024.103450.
- [13] Y. Yin, Y. Yang, Y. Yu, D. Wang, and T. C. E. Cheng, "Robust vehicle routing with drones under uncertain demands and truck travel times in humanitarian logistics," *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 174, p. 102781, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.trb.2023.102781.
- [14] L. Zhou, D. Zhang, S. Li, and X. Luo, "An Integrated Optimization Model of Green Supply Chain Network Design with Inventory Management," *Sustainability*, vol. 15, no. 16, p. 12583, Aug. 2023, doi: 10.3390/su151612583.
- [15] Y. Wang, X. Wang, J. Fan, Z. Wang, and L. Zhen, "Emergency logistics network optimization with time window assignment," *Expert Syst Appl*, vol. 214, p. 119145, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.eswa.2022.119145.
- [16] Y. Li, Z. Yang, S. Zhang, and W. Liu, "A Study of the Capacitated Vehicle Routing Problem with Time-Window and Three-Dimensional Loading Constraints in Land–Sea Transport," *Sustainability*, vol. 16, no. 23, p. 10272, Nov. 2024, doi: 10.3390/su162310272.