

Año 29 No. Especial 12, 2024
JULIO-DICIEMBRE



Año 29 No. Especial 12, 2024

JULIO-DICIEMBRE

Revista Venezolana de Gerencia



UNIVERSIDAD DEL ZULIA (LUZ)
Facultad de Ciencias Económicas y Sociales
Centro de Estudios de la Empresa

ISSN 1315-9984

Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons
Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 3.0 Unported.
http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/deed.es_ES

Como citar: Haro, D. A., Avalos, M. A., Mantilla, A. S., y Avalos, M. C. (2024). Gestión de Recolección de Residuos alimenticios mediante el método Vehicle Routing Problem: abordaje en Riobamba - Ecuador. *Revista Venezolana De Gerencia*, 29(Especial 12), 1099-1111. <https://doi.org/10.52080/rvgluz.29.e12.14>

Universidad del Zulia (LUZ)
Revista Venezolana de Gerencia (RVG)
Año 29 No. Especial 12, 2024, 1099-1111
julio-diciembre
ISSN 1315-9984 / e-ISSN 2477-9423



Gestión de recolección de residuos alimenticios mediante el método Vehicle Routing Problem: abordaje en Riobamba, Ecuador

Haro Avalos, Diego Alexander*
Avalos Pérez, Miguel Angel**
Mantilla Miranda, Alex Santiago***
Avalos Pérez, Martha Cecilia****

Resumen

La gestión de residuos alimenticios es un reto global con implicaciones sociales, económicas y ambientales. La optimización de rutas de recolección es una estrategia clave para mejorar la eficiencia en su manejo. El presente estudio tiene como objetivo analizar la eficiencia en la recolección de residuos alimenticios en establecimientos de Riobamba, Ecuador, evaluando el impacto en la reducción de tiempos y distancias recorridas a través del método de optimización de rutas Vehicle Routing Problem (VRP), con miras a fomentar una gestión de residuos más sostenible y alineada con los principios de la economía circular. Se evaluó un total de 26 establecimientos analizando la ruta original (RO) y tres rutas optimizadas: más corta (RMC), más rápida (RMR) y más rápida con tráfico (RMRT), mediante un enfoque cuantitativo y pruebas estadísticas no paramétricas (*Shapiro-Wilk*, *Levene*, *Kruskal-Wallis* y *post-hoc de Dunn*) usando el software R. Los resultados mostraron diferencias significativas en las medianas de los tiempos ($\chi^2=11.1308$, $p=0.01104$), y el análisis post-hoc de Dunn reveló que

Recibido: 20.06.24

Aceptado: 07.10.24

* Magister En Administración Publica Mención En Desarrollo Institucional, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Email: diego.haro@epoch.edu.ec, Riobamba, Ecuador, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6018-1267>

** Magister En Informática Aplicada, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Email: miavalos@epoch.edu.ec, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2370-9579>

*** Magister En Matemática Mención Modelación Y Docencia, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Email: alex.mantilla@epoch.edu.ec, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7047-7072>

**** Magister en Docencia Universitaria e Investigación Educativa, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Email: m_avalos@epoch.edu.ec, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2519-3067>

la RO difiere significativamente de las rutas optimizadas ($RMC: p = 0.0034$; $RMR: p = 0.002210$; $RMRT: p = 0.046415$). Los resultados demostraron que la implementación del método VRP optimizó notablemente las rutas, mejorando la eficiencia operativa y reduciendo la huella ambiental, destacando su potencial como herramienta para la gestión sostenible de residuos.

Palabras clave: gestión de residuos alimenticios; VRP; sostenibilidad ambiental; economía circular.

Food Waste Collection Management using the Vehicle Routing Problem method: approach in Riobamba - Ecuador

Abstract

Food waste management is a global challenge with social, economic and environmental implications. Optimizing collection routes is a key strategy to improve the efficiency of its management. The present study aims to analyze the efficiency of food waste collection in establishments in Riobamba, Ecuador, evaluating the impact on the reduction of times and distances traveled through the Vehicle Routing Problem (VRP) route optimization method, with a view to promoting more sustainable waste management aligned with the principles of the circular economy. A total of 26 establishments were evaluated by analyzing the original route (RO) and three optimized routes were analyzed: shortest (RMC), fastest (RMR) and fastest with traffic (RMRT), using a quantitative approach and non-parametric statistical tests (*Shapiro-Wilk*, *Levene*, *Kruskal-Wallis* and *Dunn's post-hoc*), using R software. The results showed significant differences in the median times ($\chi^2 = 11.1308$, $p = 0.01104$), and Dunn's post-hoc analysis revealed that the RO differed significantly from the optimized routes ($RMC: p = 0.0034$; $RMR: p = 0.002210$; $RMRT: p = 0.046415$). The results demonstrated that the implementation of the VRP method significantly optimized the routes, improving operational efficiency and reducing the environmental footprint, highlighting its potential as a tool for sustainable waste management.

Keywords: food waste management; VRP; environmental sustainability; circular economy.

1. Introducción

La gestión de residuos alimenticios es un desafío global con profundas repercusiones sociales, económicas y ambientales (Ruiz-Meza, 2021).

Los establecimientos alimenticios, como restaurantes y servicios de comida, generan grandes cantidades de residuos, cuya gestión inadecuada impacta la salud pública y el medio ambiente (Carmona-Cabello et al, 2020;

Karagiannis & Andrinós, 2021; Liang et al, 2021). La falta de infraestructura adecuada y prácticas deficientes expone a trabajadores y comunidades a riesgos sanitarios significativos (Garzón et al, 2023). Además, la pérdida de alimentos con valor nutritivo representa un desperdicio de recursos y agrava los problemas de seguridad alimentaria (Filimonau et al, 2021; Socas-Rodríguez et al, 2021).

En el boletín científico *INVESTIGIUM de la Escuela Superior de Tizaca*, se afirma que en el mundo existen aproximadamente 1.3 billones de toneladas de desperdicio o pérdida de alimentos. En los países más ricos, el desperdicio es de 222 millones de toneladas de la producción total aproximadamente (Lezama et al, 2021).

Un problema clave es la falta de visibilidad y conciencia sobre la magnitud de los residuos, especialmente los “invisibles,” los cuales se acentúan en el sector de la producción de alimentos, contribuyendo a una gestión inadecuada y a un mayor impacto social. Un estudio realizado por el *Departamento de Ciencias Agrícolas y Ambientales* estima que la huella hídrica de la producción mundial de alimentos asciende a aproximadamente 8,000 litros de agua por cada kilogramo de proteína animal (Lovarelli et al, 2016).

Filimonau y Coteau (2019), aseveran que estos residuos, a menudo, se pasan por alto en los procesos de evaluación tanto de sostenibilidad como de eficiencia operativa dentro de las empresas de producción de alimentos. Esto se debe además a que la mayoría de las organizaciones y consumidores tienden a centrarse en los residuos “visibles”, como los productos desechados de manera tangible, mientras que los residuos invisibles, que

a menudo, son el resultado de procesos de producción y consumo, permanecen en la sombra.

Un factor que contribuye a la ineficiencia en la gestión de residuos en el sector de alimentos y bebidas es la falta de capacitación adecuada del personal encargado de su manejo. Scherhauser et al, (2018) y Wang et al, (2019) afirman que la falta de una formación adecuada en la gestión de residuos resulta en prácticas ineficientes que no abordan la complejidad de los residuos invisibles. Contar con habilidades en el manejo de este tipo de residuos resulta ser fundamental para identificar, clasificar y gestionar estos residuos de manera efectiva.

La implementación de programas de capacitación es fundamental para mejorar la gestión de residuos, las mismas que deberían enfocarse en la sensibilización para fomentar prácticas más conscientes y responsables en el manejo de recursos (Schmauss, 2015), en la correcta segregación de residuos y la adopción de tecnologías limpias para la reducción de los desechos generados (Akcil, 2016), la optimización de recursos y la eficiencia en el uso de insumos para la sostenibilidad en la industria alimentaria (Hellin et al, 2009), en la gestión eficiente del transporte para una planificación eficiente de rutas y el uso de vehículos adecuados, no solo para una correcta separación de residuos orgánicos e inorgánicos, sino también para reducir significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas al transporte, minimizando el impacto ambiental general de la cadena de suministro alimentario (Su et al, 2023).

En Ecuador, la gestión ineficiente de residuos ha contribuido a la contaminación ambiental, a pesar de leyes como la de Economía Circular y

Reciclaje Inclusivo. La falta de inversión en soluciones ha generado efectos negativos en la salud pública y el medio ambiente (Da Costa, 2022; Medina & Freire, 2023; Wang et al, 2022). En el caso específico de Riobamba, la gestión de residuos sólidos, incluyendo los residuos alimenticios, es un tema de creciente interés. El Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Riobamba ha implementado varias iniciativas para mejorar el manejo de estos residuos, como la expedición de la Ordenanza que ha regulado la Gestión Integral de los Residuos Sólidos en 2011 (Huacho, 2010). La transición hacia un modelo de economía circular en la gestión de residuos alimenticios podría incluir estrategias como la implementación de programas de compostaje comunitario para aprovechar los residuos orgánicos, el fomento de la donación de alimentos excedentes a bancos de alimentos o comedores sociales y el desarrollo de proyectos de bioenergía que utilicen los residuos alimenticios como materia prima (Ministerio del Ambiente Agua y Transición Ecológica, 2017).

Sin embargo, aún existen desafíos por superar, como la acumulación de basura en algunos sectores de la ciudad. El sistema de recolección de residuos no incluye separación en la fuente, lo que disminuye las tasas de recuperación. Además, la falta de optimización de rutas de recolección ha exacerbado la situación. El crecimiento demográfico y los cambios en los patrones de consumo incrementan la demanda de sitios de disposición final, reduciendo su vida útil (Enciso-Gómez et al, 2019).

La implementación de estrategias como la optimización de rutas de recolección es una de las claves para mejorar la eficiencia en el manejo de residuos. Esta optimización reduce

tiempos, costos operativos y recursos, además de mejorar la gestión del talento humano involucrado (Labib et al, 2023; Ruiz-Meza, 2021; Wang et al, 2022). Escoger los criterios que se deben analizar dependerá de las regulaciones de cada país, las características de la zona y los diversos factores que componen a la población, del ámbito de influencia directo del proyecto (Canelo, 2021; Osorio-Hernández et al, 2022).

Este estudio tiene como objetivo analizar la eficiencia en la recolección de residuos alimenticios en establecimientos de Riobamba, Ecuador, evaluando el impacto en la reducción de tiempos y distancias recorridas a través del método de optimización de rutas Vehicle Routing Problem (VRP), teniendo en cuenta restricciones como la capacidad de carga y ventanas de tiempo (Penna et al, 2019; Toth & Vigo, 2002). Implementado por primera vez en 1959, el VRP ha demostrado ser crucial para la optimización de rutas debido a su relevancia práctica (Liu et al, 2023).

2. Aspectos metodológicos

El estudio se desarrolló bajo parámetros de enfoque cuantitativo, ya que está fundamentado en la recolección y análisis de datos de tipo numérico relacionado con el tiempo de recolección de residuos alimenticios generados por 26 establecimientos alimenticios en la ciudad de Riobamba, como restaurantes y cafeterías. Toda la información se documentó durante la operación diaria de los vehículos de transporte de desechos. Se incluyó además la cantidad de residuos generados, clasificados en orgánicos (*restos de alimentos y productos caducados*) e inorgánicos (*vidrio, plástico, cartón*). También se obtuvieron datos geoespaciales de

las rutas recorridas, los puntos de recolección de residuos y la distancia recorrida, útiles para el manejo del método VRP.

La investigación se ha estructurado bajo un diseño cuasi-experimental, comparando los tiempos de recolección obtenidos con la ruta habitual y las nuevas rutas basadas en VRP, aplicando técnicas estadísticas para determinar si la diferencia entre ambos es significativa y así evaluar el impacto de la implementación de VRP como un método para mejorar la eficiencia de las rutas de recolección.

La recolección de los datos se ha llevado a cabo en dos fases a través de fichas de observación durante los meses de enero a junio del 2024. En la primera fase, se recopilaban los datos de los tiempos de recolección utilizando la "Ruta Original" (RO) durante un período de tiempo definido. Durante esta fase, se tomaron medidas de tiempo del recorrido original, registrando variables adicionales como la distancia recorrida, cantidad y tipo de desecho recolectado (*orgánico o inorgánico*), la cantidad de puntos de recolección y la ubicación exacta de los establecimientos utilizando coordenadas de latitud y longitud, indispensables para el cálculo preciso de las rutas.

En la segunda fase, con la herramienta VRP Spread Solver, se implementaron tres tipos de rutas optimizadas para su posterior estudio, a las cuales se las ha denominado "Ruta más Corta" (RMC), "Ruta más Rápida" (RMR) y "Ruta más Rápida con Tráfico" (RMRT). Tras la implementación del VRP, se han medido nuevamente los tiempos de recolección, utilizando las rutas optimizadas y las variables analizadas en la fase anterior. Ambos conjuntos de datos (*antes y después del VRP*) han

sido almacenados en una base de datos estructurada para su análisis. Los datos han sido verificados para garantizar la consistencia y validez.

3. Distancias recorridas y los tiempos de conducción: análisis

El análisis se centró en la evaluación comparativa de las distancias recorridas y los tiempos de conducción para las rutas de recolección de residuos alimenticios. Los datos utilizados fueron recolectados durante las dos fases del estudio: en la primera fase, se registraron los tiempos y distancias de la ruta original (RO), y en la segunda fase, se implementaron las rutas optimizadas (RMC, RMR y RMRT). Estos datos se analizaron utilizando pruebas estadísticas no paramétricas debido a la naturaleza no normal de las distribuciones, determinadas mediante la prueba de Shapiro-Wilk. Posteriormente, se aplicaron las pruebas de Levene para homogeneidad de varianzas y Kruskal-Wallis para comparar las medianas entre las rutas. El análisis post-hoc de Dunn permitió identificar diferencias específicas entre las rutas. Este enfoque metodológico asegura que el análisis refleje las diferencias reales entre las rutas evaluadas y que los resultados sean estadísticamente significativos.

4. Rutas de recolección optimizadas análisis de las rutas de recolección optimizadas

A continuación, se presentan los resultados del análisis comparativo de las rutas de recolección de residuos alimenticios en Riobamba. Los resultados se dividen en dos partes: la

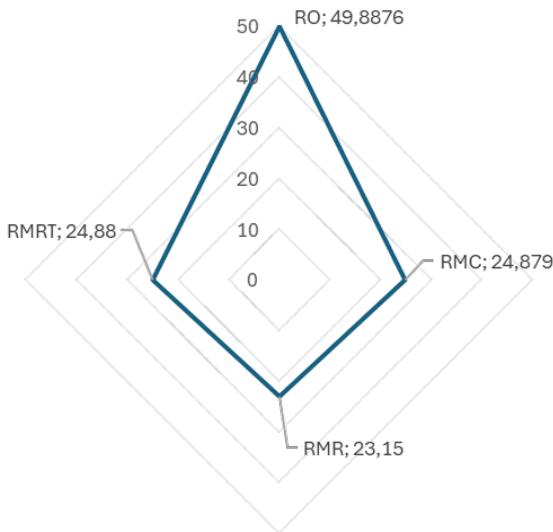
evaluación de las distancias recorridas y los tiempos de conducción. Cada subsección ofrece una interpretación detallada de los datos obtenidos de la ruta original (RO) y las rutas optimizadas (RMC, RMR, y RMRT), basadas en las pruebas estadísticas aplicadas.

4.1. Distancia recorrida

El análisis de los kilómetros totales recorridos por cada ruta ofrece una visión importante sobre la eficiencia de las alternativas de transporte evaluadas. En el Gráfico 1 se observa que la ruta

original muestra un total de 49.8876 kilómetros recorridos. Este valor es sustancialmente mayor en comparación con las otras rutas evaluadas, lo que sugiere que esta opción, aunque puede haber sido utilizada previamente por conveniencia o falta de optimización, no es la más eficiente en términos de distancia. La ruta más corta, con un total de 24.879 kilómetros, evidencia una reducción significativa en la distancia recorrida en comparación con la ruta original, alcanzando una disminución de más del 50%.

Gráfico 1
Total de kilómetros recorridos en cada una de las rutas



La ruta más rápida, con un total de 23.15 kilómetros, es la que presenta la menor distancia recorrida entre todas las alternativas evaluadas. A pesar de haber sido clasificada como una ruta más rápida, el impacto del tráfico genera que la distancia recorrida (24.88 kilómetros) se asemeje considerablemente a la de la

ruta más corta (RMC).

Los resultados sobre la distancia recorrida resaltan la importancia de elegir la ruta adecuada según las condiciones del tráfico y las prioridades del viaje. La ruta original (RO) muestra una clara desventaja frente a las alternativas evaluadas, mientras que la ruta más

rápida (RMR) se posiciona como la opción más eficiente, tanto en kilómetros recorridos como posiblemente en tiempo. Sin embargo, el tráfico juega un papel crucial en esta elección, como lo muestra el análisis de la ruta más rápida con tráfico (RMRT), cuya efectividad disminuye en estas circunstancias. Por otro lado, la ruta más corta (RMC) ofrece un equilibrio interesante, especialmente si el objetivo principal es reducir la distancia sin importar las condiciones del tráfico.

Para determinar si la reducción de las distancias de las rutas es estadísticamente significativa, en primera instancia se verificó la normalidad de los datos utilizando la prueba de Shapiro-Wilk, con la finalidad de decidir la prueba estadística con la que se debía trabajar

en los siguientes análisis.

Los resultados de la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para las diferentes rutas evaluadas en el estudio se tienen en la Tabla 1. Sugieren desviaciones significativas de la normalidad en los datos. En el caso de la RO, el valor de $W = 0.90883$ está moderadamente cercano a 1, lo que indica que los datos presentan una aproximación a una distribución normal. Sin embargo, el p-valor asociado ($p = 0.01853$) es menor al umbral convencional de 0.05, lo que lleva a rechazar la hipótesis nula de normalidad. Esto quiere decir que, aunque la distribución de los datos de la RO no se aleja drásticamente de una normal, la desviación sigue siendo estadísticamente significativa.

Tabla 1
Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para las distancias

Ruta	W	p-value
RO	0.90883	0.01853
RMR	0.83561	0.0004856
RMC	0.83914	0.0005687
RMRT	0.8358	0.0004895

En el caso de RMR, RMC y RMRT, los resultados muestran una mayor desviación de la normalidad. Los valores de w son más bajos (0.83561, 0.83914 y 0.8358 respectivamente), lo que refleja que los datos se apartan más considerablemente de una distribución normal ideal. Los p-valores correspondientes (todos menores a 0.001) son bajos, reforzando la conclusión de que las rutas optimizadas no siguen una distribución normal de manera estadísticamente significativa. Dados estos resultados, se determinó

que para el análisis de estas rutas era necesario emplear técnicas estadísticas no paramétricas que no asumen normalidad en los datos.

La prueba de Levene para la homogeneidad de varianzas (con centralización en la mediana), arrojó un valor $F = 4.66$ con 3 grados de libertad entre los grupos y 108 grados de libertad dentro de los grupos. El p-valor asociado fue 0.004211, lo que indica una diferencia estadísticamente significativa ($p < 0.01$) en la variabilidad de las distancias entre las diferentes rutas

evaluadas. Este resultado determinó que las varianzas no son homogéneas entre los grupos, rompiendo el supuesto de homogeneidad de varianzas, lo que reforzó la elección de pruebas no paramétricas en los análisis posteriores.

Entonces, para determinar si existen diferencias significativas en las medianas de las distancias entre las diferentes rutas, se aplicó la prueba de Kruskal-Wallis. Este análisis arrojó un valor de chi-cuadrado de 11.1308 con

un p-valor de 0.01104, indicando una diferencia estadísticamente significativa entre la ruta actual y las rutas optimizadas.

Debido al resultado obtenido anteriormente, se realizó un análisis post-hoc para identificar específicamente qué grupos difieren entre sí. La Tabla 2 revela los resultados del análisis post-hoc de las distancias recorridas por ruta, con la corrección de Bonferroni.

Tabla 2
Análisis post-hoc con corrección de Bonferroni. Comparación de las distancias por grupo

Col Mean Row Mean	RO	RMC	RMR
RMC	2,802559 0,0152*		
RMR	2,689387 0,0215*	-0,113172 1,0000	
RMRT	2,672925 0,0226*	-0,129633 1,0000	-0,016461 1,0000

$\alpha = 0.05$

Reject H_0 if $p \leq \alpha/2$

Los resultados presentados en la Tabla 2 confirman diferencias significativas entre la ruta original (RO) y las rutas optimizadas (RMC, RMR y RMRT), con p-valores de 0.0152, 0.0215 y 0.0226, respectivamente. Sin embargo, al comparar las rutas optimizadas entre sí, los p-valores exceden el umbral de significancia ajustado, lo que indica que no existen diferencias estadísticamente relevantes entre ellas. A partir de estos hallazgos, se puede determinar que es factible utilizar cualquiera de las rutas generadas por la herramienta VRP Spread Solver, ya que todas ofrecen una mejora significativa de las distancias en comparación con la ruta original.

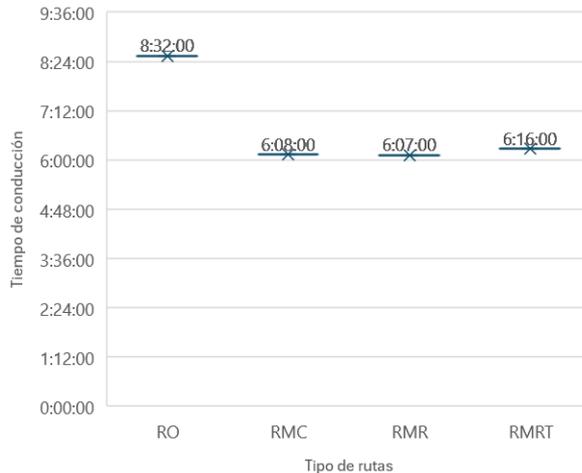
4.2. Tiempo de conducción

El Gráfico 2 presenta los resultados obtenidos sobre el tiempo de conducción para las diferentes rutas evaluadas, la misma que mostró diferencias importantes en cuanto a eficiencia. La ruta original (RO) presentó un tiempo de conducción de 8 horas y 32 minutos, lo que indica claramente que es la opción menos eficiente entre todas las rutas analizadas. Las rutas optimizadas, por otro lado, presentan tiempos de conducción considerablemente menores. La ruta más corta (RMC) tiene un tiempo de 6 horas y 8 minutos, mientras que la ruta más rápida (RMR)

reduce este tiempo ligeramente a 6 horas y 7 minutos. La ruta más rápida bajo condiciones de tráfico (RMRT), sin

embargo, presenta un incremento de tiempo hasta las 6 horas y 16 minutos.

Gráfico 2
Tiempo total de conducción en cada una de las rutas



Desde esta perspectiva, las rutas optimizadas (*RMC*, *RMR* y *RMRT*) son significativamente más eficientes que la ruta original (*RO*). La reducción de más de 2 horas en los tiempos de conducción es notoria, lo que sugiere una mejora en la planificación del trayecto. Entre las rutas optimizadas, la ruta más rápida (*RMR*) ofrece el menor tiempo de conducción, aunque la diferencia con la ruta más corta (*RMC*) es mínima, tan solo un minuto. Esta diferencia no es suficiente para considerarse decisiva desde una perspectiva práctica, lo que sugiere que ambas rutas pueden considerarse equivalentes en términos de eficiencia bajo condiciones normales de tráfico.

Por otra parte, la ruta más rápida con tráfico (*RMRT*) muestra un

incremento de tiempo hasta 6 horas y 16 minutos. Este resultado subraya la influencia que tiene el tráfico en la selección de la ruta. A pesar de ser una opción optimizada, la *RMRT* pierde eficiencia en comparación con las otras dos rutas cuando el tráfico es un factor. Esto sugiere que, si bien la *RMR* podría ser preferible en condiciones ideales, cuando el tráfico es una preocupación, la ruta más corta *RMC* podría ser una mejor opción debido a su estabilidad frente a variaciones en las condiciones del tráfico.

Con el fin de verificar si la reducción del tiempo de conducción es estadísticamente significativa, se evaluó la normalidad de los datos de los tiempos de conducción mediante la prueba de Shapiro-Wilk.

Tabla 3
Prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para los tiempos de conducción

Ruta	W	p-value
RO	0.90983	0.02261
RMR	0.8894	0.007716
RMC	0.82574	0.0003954
RMRT	0.89146	0.008573

Los resultados mostraron que, en todos los casos, los valores p son menores a 0.05, lo que indica que ninguna de las distribuciones sigue una normalidad significativa. En concreto, el valor $W = 0.90983$ para RO, con un p -value de 0.02261, indica que los datos de esta ruta presentan desviaciones leves de una distribución normal. De manera similar, para la RMC, el valor $W = 0.82574$ y el p -value = 0.0003954, lo que explica una mayor desviación de la normalidad en comparación con la RO. Para la RMR, el valor $W = 0.8894$ y el p -value = 0.007716, también reflejando una significativa desviación de la normalidad. Finalmente, la RMRT presentó un $W = 0.89146$ y un p -value = 0.008573, lo cual refuerza la conclusión de que todas las rutas evaluadas no siguen una distribución normal de tiempos y sugirió la necesidad de emplear métodos no paramétricos en

los análisis subsiguientes.

Dado que los datos no siguen una distribución normal, se utilizó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis para comparar las medianas de los tiempos entre las distintas rutas. El valor de chi-cuadrado obtenido fue de 16.083, con un p -value de 0.00109. Este resultado indica que existe una diferencia estadísticamente significativa entre las distribuciones de tiempos de las diferentes rutas evaluadas, es decir, al menos una de las rutas tiene un tiempo significativamente diferente de las demás. Este hallazgo justificó la realización de comparaciones post hoc para identificar las rutas específicas que difieren entre sí. Entonces, para identificar las diferencias entre los grupos de tiempos entre rutas, se utilizó la prueba de Dunn, junto con la corrección de Bonferroni para múltiples comparaciones (Tabla 4).

Tabla 4
Prueba Dunn post-hoc con corrección de Bonferroni.
Comparación de tiempos de manejo por grupo

Col Mean Row Mean	RO	RMC	RMR
RMC	3.257959 0.0034*		
RMR	3.260169 0.0033*	0.002210 1,0000	
RMRT	3.304375 0.0029*	0.046415 1,0000	0.044205 1,0000

$\alpha = 0.05$

Reject H_0 if $p \leq \alpha/2$

Se pudo determinar con estos resultados que, al comparar la RO versus la RMC, RMR y RMRT, se obtuvieron valores de p inferiores a 0.025 (0.0034, 0.0033 y 0.0029, respectivamente). Esto ha permitido establecer que cada una de las rutas optimizadas difieren significativamente de la RO siendo esta última la menos eficiente en términos de tiempo, ya que sus valores correspondientes a las diferencias de medias son altas ($RO-RMC = 3.257959$, $RO-RMR = 3.260169$, $RO-RMRT = 3.304375$) en relación con las demás combinaciones ($RMC-RMR = 0.002210$, $RMC-RMRT = 0.046415$, $RMR-RMRT = 0.044205$). Con respecto a las rutas optimizadas, se determinó que las rutas sin tráfico son más eficientes (RMC y RMR), en donde la RMC demostró ser la más eficiente entre las comparadas.

5. Conclusiones

El presente estudio ha demostrado que la implementación del método de optimización de rutas Vehicle Routing Problem (VRP) mejora significativamente la eficiencia en la recolección de residuos alimenticios en los establecimientos de Riobamba, Ecuador. Los resultados evidencian una notable reducción en los tiempos y distancias de recolección, lo que no solo optimiza el uso de recursos, sino que también disminuye los costos operativos relacionados con el combustible, mantenimiento vehicular y mano de obra. Además, esta optimización contribuye a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, alineándose con los objetivos de sostenibilidad ambiental.

Asimismo, la aplicación del VRP ha incrementado la puntualidad y eficiencia del proceso de recolección, mitigando los riesgos sanitarios y ambientales

asociados con la acumulación de desechos. La flexibilidad del método permite ajustar el modelo a diversas condiciones y variaciones en la generación de residuos, asegurando una gestión robusta y resiliente.

Finalmente, la optimización de rutas mediante el VRP no solo beneficia la operación y el ambiente de manera inmediata, sino que también fomenta una gestión de residuos más sostenible, en línea con los principios de la economía circular. Los resultados obtenidos en este estudio pueden ser replicados en otras ciudades con características similares, proporcionando un modelo efectivo y adaptable para la mejora de la gestión de residuos a nivel nacional e internacional.

Referencias bibliográficas

- Akcil, A. (2016). WEEE: Booming for sustainable recycling. *Waste Management*, 57, 1–2. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.10.014>
- Canelo, C. A. (2021). Criterios y métodos para seleccionar la ubicación de los rellenos sanitarios. *Revista de Investigación de Agroproducción Sustentable*, 5(2), 9. <https://doi.org/10.25127/aps.20212.764>
- Carmona-Cabello, M., García, I. L., Sáez-Bastante, J., Pinzi, S., Koutinas, A. A., & Dorado, M. P. (2020). Food waste from restaurant sector – Characterization for biorefinery approach. *Bioresource Technology*, 301, 122779. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122779>
- Da Costa, C. C. (2022). La Economía Circular como eje de desarrollo de los países latinoamericanos. *Revista Economía y Política*, 35, 1–18. <https://doi.org/10.25097/rep.n35.2022.01>
- Enciso-Gómez, D., Antonio Cervantes,

- P. H., Robles Martínez, F., Durán-Páramo, E., & Castro-Frontana, D. G. (2019). Sistemas de información geográfica para optimizar el transporte de residuos a sitios de disposición final en el Estado de México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 35(esp02), 55–67. <https://doi.org/10.20937/RICA.2019.35.esp02.06>
- Filimonau, V., & Coteau, D. A. D. (2019). *Food waste management in hospitality operations: A critical review*. <https://doi.org/10.1016/j.tourman.2018.10.009>
- Filimonau, V., Nghiem, V. N., & Wang, L. (2021). Food waste management in ethnic food restaurants. *International Journal of Hospitality Management*, 92, 102731. <https://doi.org/10.1016/j.ijhm.2020.102731>
- Garzón, M. O., Rodríguez, F. L., Callejas, L. M. S., Alviar, J. J. A., Arango, D. C., Sanchez, M. O., Cardona, Á. M. S., Mejía, M. C. T., & Kambourova, I. M. (2023). Sanitary and environmental conditions related to food poisoning among informal street vendors in downtown Medellín, Colombia, 2016. *Revista Brasileira de Medicina Do Trabalho*, 21(01), 01–15. <https://doi.org/10.47626/1679-4435-2023-806>
- Hellin, J., Lundy, M., & Meijer, M. (2009). Farmer organization, collective action and market access in Meso-America. *Food Policy*, 34(1), 16–22. <https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2008.10.003>
- Huacho, H. (2010). *Estudio socioeconómico de las comercializadoras de desechos sólidos y su manipulación en la ciudad de Riobamba*. Universidad Nacional de Chimborazo.
- Karagiannis, D., & Andrinou, M. (2021). The Role of Sustainable Restaurant Practices in City Branding: The Case of Athens. *Sustainability*, 13(4), 2271. <https://doi.org/10.3390/su13042271>
- Labib, M., Mohamed, L., Elsherie, T., & Abdel Aal, F. (2023). Food Waste Management as a Business Entrepreneurship Tool in Fast Food Restaurants in Matrouh Governorate. *Journal of Tourism, Hotels and Heritage*, 6(2), 55–72. <https://doi.org/10.21608/sis.2023.216231.1145>
- Lezama, E., Lezama, M. H., Galindo, A. E. S., & Figueroa, H. (2021). Análisis de la Logística Inversa de Productos Perecederos en México. *Boletín Científico INVESTIGIUM de La Escuela Superior de Tizayuca*, 6(12), 1–7. <https://doi.org/10.29057/est.v6i12.5576>
- Liang, Y., Song, Q., Liu, G., & Li, J. (2021). Uncovering residents and restaurants' attitude and willingness toward effective food waste management: A case study of Macau. *Waste Management*, 130, 107–116. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.05.021>
- Liu, F., Lu, C., Gui, L., Zhang, Q., Tong, X., & Yuan, M. (2023). Heuristics for Vehicle Routing Problem: A Survey and Recent Advances. In *Cornell University* (pp. 1–67). <https://doi.org/10.48550/arXiv.2303.04147>
- Lovarelli, D., Bacenetti, J., & Fiala, M. (2016). Water Footprint of crop productions: A review. *Science of The Total Environment*, 548–549, 236–251. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.022>
- Medina, J., & Freire, A. (2023). Barreras para la implementación de la economía circular en países en vías de desarrollo. *Estudios de La Gestión: Revista Internacional de Administración*, 14, 99–121. <https://doi.org/10.32719/25506641.2023.14.6>
- Ministerio del Ambiente Agua y

- Transición Ecológica. (2017). *MAE y GAD de Riobamba firmaron carta de compromiso para el manejo integral de desechos sólidos*. <https://www.ambiente.gob.ec/mae-y-gad-de-riobamba-firmaron-carta-de-compromiso-para-el-manejo-integral-de-desechos-solidos/>
- Osorio-Hernández, V. O., Morales Bautista, B. N., & Huerta-Paniagua, R. A. (2022). Diagnóstico del manejo de residuos sólidos urbanos: estudio de caso del municipio de Chicoloapan, estado de México. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 6(4), 3715–3727. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v6i4.2880
- Penna, P. H. V., Subramanian, A., Ochi, L. S., Vidal, T., & Prins, C. (2019). A hybrid heuristic for a broad class of vehicle routing problems with heterogeneous fleet. *Annals of Operations Research*, 273(1–2), 5–74. <https://doi.org/10.1007/s10479-017-2642-9>
- Ruiz-Meza, J. (2021). Problema de ruteo de vehículos multi-objetivo con entregas y recogidas simultáneas y minimización de emisiones. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 29(3), 435–449. <https://doi.org/10.4067/S0718-33052021000300435>
- Scherhauer, S., Moates, G., Hartikainen, H., Waldron, K., & Obersteiner, G. (2018). Environmental impacts of food waste in Europe. *Waste Management*, 77, 98–113. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.04.038>
- Schmauss, S. (2015). Sustainability Assessment Tools in Higher Education Institutions: Mapping Trends and Good Practices Around the World. *Journal of Cleaner Production*, 106, 332. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.12.049>
- Socas-Rodríguez, B., Álvarez-Rivera, G., Valdés, A., Ibáñez, E., & Cifuentes, A. (2021). Food by-products and food wastes: are they safe enough for their valorization? *Trends in Food Science & Technology*, 114, 133–147. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.05.002>
- Su, I.-H., Wu, L., & Tan, K. H. (2023). The future of the food supply chain: A systematic literature review and research directions towards sustainability, resilience, and technology adoption. *Journal of Digital Economy*, 2, 303–316. <https://doi.org/10.1016/j.jdec.2024.03.001>
- Toth, P., & Vigo, D. (2002). *The Vehicle Routing Problem* (P. Toth & D. Vigo (eds.)). Society for Industrial and Applied Mathematics. <https://doi.org/10.1137/1.9780898718515>
- Wang, K., Costanza-van den Belt, M., Heath, G., Walzberg, J., Curtis, T., Berrie, J., Schröder, P., Lazer, L., & Altamirano, J. (2022). *Circular economy as a climate strategy: current knowledge and calls-to-action*. <https://doi.org/10.2172/1897625>
- Wang, X., Rodrigues, V. S., & Demir, E. (2019). Managing Your Supply Chain Pantry: Food Waste Mitigation Through Inventory Control. *IEEE Engineering Management Review*, 47(2), 97–102. <https://doi.org/10.1109/EMR.2019.2915064>