



José Armando Olvera-Castillo

E-mail: ol434522@uaeh.edu.mx

Orcid: <https://orcid.org/0009-0005-0428-3110>

Rafael Granillo-Macías

E-mail: rafaelgm@uaeh.edu.mx

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-1015-667X>

Francisca Santana-Robles

E-mail: profe_7739@uaeh.edu.mx

Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-3301-9790>

Isaias Simon-Marmolejo

E-mail: isaiasm@uaeh.edu.mx

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-2116-6192>

Universidad Autonoma del Estado de Hidalgo, México.

Cita sugerida (APA, séptima edición)

Olvera-Castillo, J. A., Granillo-Macías, R., Santana-Robles, F., & Simon-Marmolejo, I. (2024). Optimización de rutas y localización de instalaciones para la distribución eficiente de alimentos. *Portal de la Ciencia*, 5(2), 130-149, DOI: <https://doi.org/10.51247/pdlc.v5i2.435>.

==== O ====

Optimización de rutas y localización de instalaciones para la distribución eficiente de alimentos

RESUMEN

La gestión eficiente de la cadena de suministro y la logística en la distribución de alimentos a instituciones educativas requiere una cuidadosa planificación de rutas y la ubicación estratégica de instalaciones. En este estudio, se abordan estos aspectos críticos a través de un enfoque práctico en el estado de Sinaloa, México. Se propone un diseño de red de rutas para la entrega de desayunos en escuelas de bajos recursos en dos municipios, abordando la baja eficiencia y las largas distancias que se generan en el enrutamiento directo desde la distribuidora hacia cada ubicación. Se aplican métodos como la Ley de Haversine para el cálculo de distancias y el método de centro de gravedad para la localización de almacenes intermedios. Además, se utiliza el algoritmo de ahorro Clarke & Wright para la optimización de rutas, considerando variables como tipo de escuela, turno y localidad para una distribución eficaz y una mejor atención a las necesidades educativas y de salud de las instituciones identificadas como prioritarias. Los resultados muestran un enfoque para la distribución de alimentos considerando diferentes enfoques para la logística.

Palabras clave: Localización de instalaciones, enrutamiento de vehículos, distribución de alimentos, logística

Optimization of routes and location of facilities for the efficient distribution of food

ABSTRACT

Efficient supply chain and logistics management in the distribution of food to educational institutions requires careful route planning and strategic location of facilities. In this study, these critical aspects are addressed through a practical approach in the state of Sinaloa, Mexico. A route network design is proposed for the delivery of breakfast in low-income schools in two municipalities, addressing the low efficiency and long distances generated in direct routing from the distributor to each location. Methods such as Haversine's Law are applied to calculate distances and the center of gravity method to locate intermediate warehouses. In addition, the Clarke & Wright savings algorithm is used to optimize routes, considering variables such as type of school, shift, and location for effective distribution and better attention to the educational and health needs of the institutions identified as priorities. The results show an approach to food distribution that considers different approaches to logistics.

Keyword: Facility location, vehicle routing, food distribution, logistics

==== O ====

Otimização de rotas e localização de instalações para distribuição eficiente de alimentos

RESUMO

A gestão eficiente da cadeia de abastecimento e da logística na distribuição de alimentos às instituições de ensino exige um planejamento cuidadoso das rotas e a localização estratégica das instalações. Neste estudo, estes aspectos críticos são abordados através de uma abordagem prática no estado de Sinaloa, México. É proposto um desenho de rede de rotas para a entrega de café da manhã em escolas de baixa renda em dois municípios, abordando a baixa eficiência e as longas distâncias geradas no roteamento direto da distribuidora para cada localidade. Métodos como a Lei de Haversine são aplicados para calcular distâncias e o método do centro de gravidade para localizar armazéns intermediários. Além disso, utiliza-se o algoritmo de poupança de Clarke & Wright para otimizar rotas, considerando variáveis como tipo de escola, turno e localização para distribuição efetiva e melhor atenção às necessidades educacionais e de saúde das instituições identificadas como prioritárias. Os resultados mostram uma abordagem à distribuição de alimentos considerando diferentes abordagens à logística.

Palavras-chave: Localização de instalações, roteirização de veículos, distribuição de alimentos, logística

==== O ====

INTRODUCCIÓN

La localización de instalaciones y el enrutamiento de vehículos son aspectos críticos en la gestión de operaciones y la logística moderna. Ambos temas están estrechamente relacionados, ya que la ubicación estratégica de instalaciones afecta directamente el diseño de rutas eficientes para el transporte de mercancías y la prestación de servicios.

La localización de instalaciones es un proceso complejo que involucra la selección del lugar óptimo para establecer centros de distribución, almacenes, plantas de producción u otros

tipos de instalaciones. Según Haris et al. (2019), la localización de instalaciones es esencial para optimizar la cadena de suministro y reducir costos logísticos. Los autores destacan la importancia de considerar múltiples criterios, como costos de transporte, demanda del mercado, disponibilidad de mano de obra y regulaciones gubernamentales.

Otro aspecto importante además de la localización de instalaciones son los denominados problemas de ruteo de vehículos los cuales son de gran importancia en la logística y el transporte, ya que implican la optimización de rutas para minimizar costos y tiempos de entrega (Krishna et al., 2023).

El problema de ruteo de vehículos implica la optimización de rutas para minimizar costos operativos y tiempos de entrega, al mismo tiempo que se satisfacen las restricciones y demandas de los clientes. Desde la optimización hasta la eficiencia y la resolución de problemas complejos, los investigadores han desarrollado una amplia gama de herramientas y métodos para mejorar la planificación de rutas de vehículos. Con base en estos antecedentes, el objetivo de esta investigación es proponer un diseño de una red de rutas para la distribución eficiente mediante un caso de estudio práctico enfocado en la entrega de desayunos a escuelas de bajos recursos en dos municipios ubicados en el estado de Sinaloa, México. La hipótesis de esta investigación sugiere que se puede optimizar una ruta considerando la implementación del enrutamiento de vehículos con capacidad (CVRP) desde un punto de distribución hacia las diferentes ubicaciones. En este estudio se considera también el enfoque con base en la propuesta de distribución de Granillo-Macias (2021). La principal problemática a abordar es la baja eficiencia y las largas distancias que se generarían al realizar el enrutamiento directo desde la distribuidora hacia cada ubicación, por lo que en esta propuesta se busca identificar una nueva localización para almacenes intermedios que permitan mejorar la eficiencia del enrutamiento de vehículos utilizando el método de centro de gravedad, los modelos de ahorro y el enrutamiento de vehículos.

REVISIÓN DE LITERATURA

El ruteo de los vehículos y la ubicación de las instalaciones están estrechamente entrelazadas en la optimización de la cadena de suministro. El problema de ubicación-enrutamiento integra estos dos aspectos, optimizando la ubicación de las instalaciones y las rutas de distribución simultáneamente (Tadaros y Migdalas, 2022) (Arslan, 2021). Los escenarios del mundo real a menudo involucran a tomadores de decisiones que enfrentan múltiples objetivos en conflicto, lo que lleva a la necesidad de técnicas de optimización multiobjetivo (Ajayan et al. 2019). Además, con la incorporación de demandas estocásticas y tamaños variables de las instalaciones se complica aún más el proceso de optimización, lo que requiere enfoques innovadores como algoritmos heurísticos para soluciones eficientes. Las aplicaciones prácticas, como los modelos de agricultura comunitaria, demuestran los beneficios tangibles de abordar estos problemas, mostrando importantes ahorros de costos a través de ubicaciones optimizadas de las instalaciones y estrategias de rutas de vehículos.

En la literatura sobre enrutamiento de vehículos, los algoritmos de optimización juegan un papel fundamental. Ballou (2004) describe el algoritmo del vecino más cercano y su aplicabilidad en el enrutamiento de vehículos. Este algoritmo, aunque simple, demostró ser efectivo para encontrar soluciones cercanas a la óptima en tiempos razonables, especialmente en entornos con múltiples destinos y restricciones. Por otro lado, la optimización heurística ha ganado popularidad en el campo del enrutamiento de vehículos. Fernandez (2011) proporciona una revisión exhaustiva de diversas técnicas heurísticas utilizadas para resolver el problema de enrutamiento de vehículos, incluyendo la búsqueda tabú, la búsqueda local y los algoritmos genéticos. Estos enfoques ofrecen soluciones aproximadas pero eficientes para problemas de enrutamiento complejos. La eficiencia en la planificación de rutas es otro aspecto crítico en los problemas de ruteo de vehículos. Investigaciones como las de Daza et

al. (2009) han abordado la eficiencia en la planificación de rutas de vehículos utilizando técnicas de optimización y heurísticas.

Los procedimientos heurísticos son los métodos que se utilizan para solucionar problemas de enrutamiento, utilizando un enfoque visual, donde la estructura del problema se utiliza para obtener la mejor solución (Olivera, 2004). Murray (2018) menciona que las empresas dedicadas al rubro logístico que operan con vehículos propios utilizan heurísticas donde los vehículos comienzan y terminan en el mismo lugar, con la finalidad de asegurar un reposicionamiento de los vehículos y del personal en un mínimo posible.

En particular las versiones capacitadas de los problemas de ruteo son esenciales para realizar estimaciones de costos precisas y una planificación logística eficiente (Carrasco et al. 2021) (Tordecilla et al. 2020). La resolución de problemas complejos en el ruteo de vehículos ha sido objeto de estudio por parte de diversos investigadores. Por ejemplo, Arango et al. (2008) han investigado la resolución de problemas de ruteo de vehículos con restricciones dinámicas, como cambios en la disponibilidad de vehículos o alteraciones en las demandas de los clientes. Algunas de las contribuciones alrededor de los modelos de ruteo y localización se incluyen las propuestas de Jannik et al. (2013) los cuales presentan un enfoque de optimización multicriterio para la localización de instalaciones. Utilizando técnicas avanzadas de programación lineal, los investigadores desarrollaron un modelo que evalúa ubicaciones potenciales en función de criterios como costos operativos, tiempos de entrega y proximidad a proveedores y clientes. Este enfoque permite tomar decisiones informadas y estratégicas sobre la ubicación de instalaciones en entornos complejos. Otro aspecto relevante en la localización de instalaciones es su impacto en áreas urbanas. Bertha et al. (2016) analizan cómo la ubicación de centros de distribución en entornos urbanos congestionados puede afectar la eficiencia logística y la movilidad. Proponen un marco de trabajo que integra datos geoespaciales y modelos de optimización para abordar estos desafíos específicos, considerando también el transporte público y la sostenibilidad ambiental.

En la propuesta de Mei y Zhang (2023) los algoritmos heurísticos propuestos tienen como objetivo encontrar soluciones casi óptimas para problemas de rutas de vehículos con múltiples tanques. Estos algoritmos aprovechan técnicas de aprendizaje automático para seleccionar los métodos más efectivos para diferentes escenarios).

En el contexto de la distribución de petróleo, Liapis y Nenes (2023) utilizan un modelo de programación lineal entera mixta (MILP) para optimizar las rutas para camiones cisterna, considerando diversas limitaciones como la asignación de combustible y la satisfacción de la demanda del cliente. Granillo-Macias (2021) propone también un modelo logístico para la distribución de alimentos considerando aspectos cuantitativos y cualitativos aplicando técnicas cluster.

Liu et al. (2022) desarrollan un algoritmo heurístico para optimizar simultáneamente la estructura y las frecuencias de las rutas, garantizando una asignación de flujo eficiente y la utilización de la capacidad de los vehículos, además, se proponen heurísticas rápidas basadas en instancias del árbol Steiner de recolección de premios para problemas deterministas de enrutamiento de inventario, logrando soluciones casi óptimas y reduciendo significativamente el tiempo de cálculo mostrando la efectividad de los algoritmos heurísticos para abordar desafíos complejos de rutas de vehículos con múltiples tanques. Además, la resolución de problemas de ruteo de vehículos en entornos urbanos ha sido abordada por autores como García et al. (2013), quienes han propuesto modelos y algoritmos específicos para este contexto.

METODOLOGÍA

La metodología propuesta para esta investigación consistió en la aplicación práctica a través de un caso de estudio en el estado de Sinaloa en México, para lo cual se inició por la identificación y localización de las ubicaciones de interés, considerando en este caso la distribución de alimentos entre escuelas que cuentan con poblaciones de estudiantes vulnerables en términos de seguridad alimentaria.

Con base en las ubicaciones, se realizó el diseño de las rutas mediante el cálculo de distancias entre cada una de las ubicaciones seleccionadas, para ello se aplicó la Ley de Haversine la cual permite realizar el cálculo para el modelo de estudio con base en la propuesta de Dauni et al. (2019). La fórmula de Haversine se basa en ecuaciones que se utilizan en función de la forma esférica eliminando el factor de que la tierra es ligeramente elíptica (factor elipsoidal). El cálculo de la distancia de una ubicación a otra de la superficie terrestre considera la afectación por un cierto grado de curvatura como se observa en el gráfico 1.

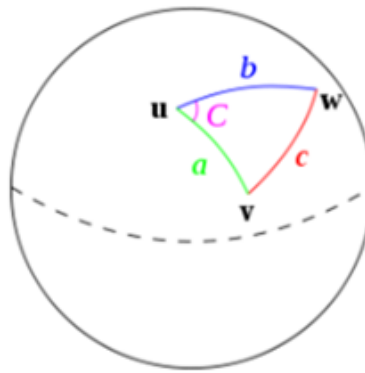


Gráfico 1. Ley de Harversine

La Figura 1 implica tres coordenadas las cuales forman el constructor de distancias formulados de acuerdo a las Ec 1-6

$$\text{haversine}(c) = \text{haversine}(a - b) \quad \text{Ec.1}$$

$$\sin(a) \sin(b) \text{haversine}(c) \quad \text{Ec.2}$$

$$\Delta \text{long} = (\text{long}2 + \text{long}1) \cos\left(\frac{\text{lat}1 + \text{lat}2}{2}\right) = \cos a \cos b - \sin a \sin b \quad \text{Ec.3}$$

$$\Delta \text{lat} = (\text{lat}2 - \text{lat}1) \quad \text{Ec.4}$$

$$d = \sqrt{(a)R} \quad \text{Ec.5}$$

$$a = \sin^2\left(\frac{\Delta \text{lat}}{2}\right) + \cos(\text{lat}1) \cos(\text{lat}2) \sin^2\left(\frac{\Delta \text{long}}{2}\right) \quad \text{Ec. 6}$$

Donde:

R = radio de la tierra en (km)

Δlat = cantidad de cambio en latitud (km)

Δlong = magnitud del cambio en longitud (km)

d = distancia (km).

Después de determinar la magnitud de las distancias para cada ubicación, se realizó el cálculo para la localización del centro de distribución utilizando el método de centro de gravedad bajo las condiciones que mencionan Heizer y Render (2013) relacionado con que, para encontrar

la mejor ubicación para un centro de distribución, se tiene en cuenta la ubicación del mercado, el volumen de bienes enviados al mercado y los costos de transporte. Bayu et al. (2018) destacan que el enfoque del centro de gravedad se utiliza para seleccionar una ubicación que pueda minimizar la distancia o el costo de las instalaciones existentes. La demanda de alimentos de las ubicaciones expresada mediante la matrícula escolar fue considerado como elemento clave (ponderaciones) para el cálculo del método de centro de gravedad (Ec.7).

$$(CG_x, CG_y) = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (x_i w_i)}{\sum_{i=1}^n w_i}, \frac{\sum_{i=1}^n (y_i w_i)}{\sum_{i=1}^n w_i} \right) \quad \text{Ec.7}$$

Donde

CG_x, CG_y = Centro de gravedad (x,y)

w_i = ponderación del indicador

Con el propósito de realizar una clasificación de ubicación que permitiera realizar el enrutamiento de vehículos y considerando la propuesta de Granillo-Macias (2021) se aplicó una técnica cluster. De acuerdo a Vilà-Baños et al. (2014) el clúster es una técnica de clasificación que sirve para poder detectar y describir subgrupos de sujetos o variables homogéneas en función de los valores observados dentro de un conjunto aparentemente heterogéneo y fundamentado en el estudio de las distancias entre ellos, permitiendo el analizar y cuantificar el grado de similitud, en el caso de las proximidades, y el grado de diferencia, en el caso de las distancias. El objetivo fundamental de esta técnica es la configuración de grupos similares y homogéneos para poder entender y estudiar mejor los fenómenos sociales y educativos.

Finalmente se aplicó la heurística del algoritmo de ahorro Clarke & Wright como propuesta de solución al problema de enrutamiento considerando que esta heurística es la más utilizada para la resolución del problema de ruteo de vehículos, también es llamada algoritmo de ahorro ya que mediante una matriz de ahorro se generan rutas y se escogen las de mayores ahorros dentro de la matriz.

RESULTADOS

Mediante bases de datos de las instituciones educativas del Estado de Sinaloa que el gobierno de México proporciona a través de SIGED (2023), se realizó la identificación de estas incluyendo el nombre de la institución educativa, el tipo de escuela, número de alumnos matriculados por institución, el turno de operación, la capacidad instalada en relación a la cantidad de aulas, nivel educativo, orientación, así como la ubicación en latitud y longitud.

Posteriormente para identificar las instituciones vulnerables se realizó una selección con la finalidad de considerar el número de alumnos matriculados de cada institución para estimar la demanda del modelo, así como el nivel de infraestructura para establecer las instituciones con mayor prioridad de atención.

Se ejecuto una clasificación del nivel educativo enfocado, ya que de acuerdo con Shamah-Levy (2020), en el país, el 8.3% de los niños y niñas de entre 2 y 5 años que están en preescolar presentan sobrepeso u obesidad y esta cifra aumenta a 33.7% a los 6 años, que es cuando comúnmente inician la primaria. Para los 15 años, cuando usualmente el estudiante ha concluido la secundaria, la prevalencia aumenta a 46.2%, lo cual indica una mayor necesidad de enfocar el estudio al nivel básico, retomando variables importantes como el tipo de escuela, turno y localidad. Se considero en infraestructura un nivel bajo entre 1 y 8 aulas, mientras que entre 25 a 32 aulas se ubicó el nivel más alto (Tabla 1).

Tabla 1. Nivel de equipamiento de aulas

Nivel	Aulas
Baja	1-8
Media	9-16
Buena	17-24
Excelente	25-32

En cuanto a las variables de matrícula, se establecieron rangos para el número de alumnos, desde un intervalo bajo de 1 a 100 hasta el intervalo de más de 700 alumnos inscritos. La clasificación completa se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Clasificación de variables

Variable	Clasificación
Tipo escuela	Inicial
	Básica
	Media Superior
	Superior
Matricula	1-100
	101-300
	301-500
	501-700
	701 o mas
Infraestructura	Baja
	Media
	Buena
	Excelente
Nivel educativo	Inicial
	Preescolar
	Primaria
	Secundaria
	Bachillerato
	Licenciatura
Orientación (Fuente de financiamiento)	Público
	Privado
Turno	Matutino
	Vespertino

Con relación a los criterios para la selección de las escuelas que formarían parte de este estudio se consideró lo expuesto por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2024), la cual señala que desde el aspecto de seguridad alimentaria, un entorno alimentario escolar se refiere a todos los espacios, la infraestructura y las condiciones dentro y alrededor de las instalaciones escolares en las que se disponen, ofrecen, distribuyen o consumen alimentos y bebidas, y su contenido nutricional, por lo que las características críticas consideradas para este caso fueron las variables de infraestructura y matrícula, agregando también las variables de turno y localidad. De manera particular, los criterios de selección se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Criterios de selección

Variable	Criterio de selección
Tipo escuela	Básica
Matricula	0-100 101-300
Infraestructura	Baja Media
Localidad	Los Mochis Guasave
Turno	Matutino

Posteriormente se realizó la selección bajo los criterios establecidos anteriormente, obteniendo un total de 55 localizadas en Guasave y 96 instituciones educativas en los Mochis, Sinaloa.

Una vez obtenidas los lugares seleccionados para la entrega de alimentos y bajo la Ley de Haversine, se realizó el cálculo de distancias en una matriz simétrica usando las coordenadas de cada ubicación. En la tabla 4 se muestra la matriz simétrica obtenida mediante el cálculo de distancias por la Ley de Haversine considerando un centro de distribución (CEDIS) sobre el que se realiza el recorrido a las diferentes instituciones educativas.

Tabla 4. Matriz simétrica del cálculo de distancias

	CEDIS	FRANCISCO NIÑOS	RUFINO	IGNAC	PROFA	GILBEF	PROFA	MIGUEL	PROFF	JUAN I	LA ME	JAIME	JOSE N	JOSE N	QUETZ	HERO	MARG	AMERI	GENEF	FRANC	PROFF	MOCT	EL CEN	
CEDIS	0.0	165.17924	171.21	165.579	169.9	171.67	166.9	168	169.2	167.9	166.2	166.2	169.6	169.3	169.3	170.7	166.7	166.8	171.7	165.5	172.1	165.3	170.9	171.3
FRANC	165.2	0	6.0403	0.48362	5.182	7.0742	2.929	2.864	4.033	2.782	1.012	2.001	4.86	4.801	4.801	5.574	1.51	1.712	6.618	0.984	7.035	3.653	5.779	6.51
NIÑOS	171.2	6.0402869	0	5.62932	2.944	3.2952	5.124	3.313	2.052	3.375	5.029	5.182	3.02	3.52	3.52	0.656	4.597	4.424	1.778	5.899	2.088	7.192	1.102	2.716
RUFIN	165.6	0.4836248	5.6293	0	4.955	6.8323	2.956	2.536	3.65	2.328	0.628	1.576	4.639	4.627	4.627	5.144	1.221	1.249	6.291	1.221	6.713	3.938	5.423	6.246
IGNAC	169.9	5.1815401	2.9439	4.95544	0	1.8989	2.968	2.556	2.235	3.605	4.352	5.382	0.326	0.68	0.68	3.141	3.737	4.166	2.016	4.581	2.3	4.816	1.881	1.405
PROFA	171.7	7.074193	3.2952	6.83229	1.899	0	4.775	4.364	3.7	5.258	6.22	7.125	2.224	2.412	2.412	3.797	5.612	5.964	1.548	6.477	1.414	6.431	2.319	0.671
GILBEF	166.9	2.9292883	5.1237	2.95616	2.968	4.7752	0	2.211	3.257	3.288	2.582	4.155	2.664	2.367	2.367	4.954	2.096	2.965	4.883	2.026	5.224	2.075	4.371	4.366
PROFA	168	2.8644863	3.3133	2.53642	2.556	4.3635	2.211	0	1.263	1.243	1.908	2.836	2.27	2.421	2.421	2.972	1.356	1.61	3.758	2.59	4.178	4.209	2.921	3.748
MIGUEL	169.2	4.0325264	2.0523	3.64974	2.235	3.7004	3.257	1.263	0	1.605	3.032	3.513	2.072	2.452	2.452	1.729	2.558	2.516	2.749	3.847	3.179	5.323	1.806	3.035
PROFF	167.9	2.7823239	3.3751	2.32792	3.605	5.258	3.288	1.243	1.605	0	1.794	1.908	3.359	3.593	3.593	2.842	1.597	1.081	4.349	2.942	4.779	5.127	3.388	4.602
JUAN I	166.2	1.011901	5.0295	0.62839	4.352	6.2197	2.582	1.908	3.032	1.794	0	1.613	4.039	4.053	4.053	4.563	0.622	0.77	5.663	1.276	6.084	3.873	4.798	5.627
LA ME	166.2	2.0006316	5.1816	1.57591	5.382	7.1248	4.155	2.836	3.513	1.908	1.613	0	5.104	5.242	5.242	4.589	2.066	1.276	6.257	2.764	6.687	5.455	5.292	6.479
JAIME	169.6	4.8595822	3.0198	4.6391	0.326	2.2244	2.664	2.27	2.072	3.359	4.039	5.104	0	0.501	0.501	3.15	3.422	3.874	2.264	4.255	2.575	4.55	2.003	1.724
JOSE N	169.3	4.8013634	3.5202	4.6275	0.68	2.4117	2.367	2.421	2.452	3.593	4.053	5.242	0.501	0	0	3.637	3.431	3.983	2.696	4.116	2.973	4.148	2.5	2.016
JOSE N	169.3	4.8013634	3.5202	4.6275	0.68	2.4117	2.367	2.421	2.452	3.593	4.053	5.242	0.501	0	0	3.637	3.431	3.983	2.696	4.116	2.973	4.148	2.5	2.016
QUETZ	170.7	5.5737268	0.6559	5.14354	3.141	3.7967	4.954	2.972	1.729	2.842	4.563	4.589	3.15	3.637	3.637	0	4.18	3.914	2.339	5.517	2.687	7.028	1.491	3.177
HERO	166.7	1.5101203	4.5971	1.22058	3.737	5.6117	2.096	1.356	2.558	1.597	0.622	2.066	3.422	3.431	3.431	4.18	0	0.89	5.108	1.365	5.525	3.641	4.275	5.028
MARG	166.8	1.7123088	4.424	1.24909	4.166	5.9644	2.965	1.61	2.516	1.081	0.77	1.276	3.874	3.983	3.983	3.914	0.89	0	5.239	2.026	5.667	4.508	4.32	5.337
AMERI	171.7	6.6184813	1.7784	6.29132	2.016	1.5476	4.883	3.758	2.749	4.349	5.663	6.257	2.264	2.696	2.696	2.339	5.108	5.239	0	6.214	0.43	6.813	0.992	1.076
GENEF	165.5	0.9835791	5.8989	1.22071	4.581	6.4772	2.026	2.59	3.847	2.942	1.276	2.764	4.255	4.116	4.116	5.517	1.365	2.026	6.214	0	6.612	2.718	5.465	5.961
FRANC	172.1	7.0347128	2.088	6.71275	2.3	1.4143	5.224	4.178	3.179	4.779	6.084	6.687	2.575	2.973	2.973	2.687	5.525	5.667	0.43	6.612	0	7.116	1.412	1.127
PROFF	165.3	3.6534786	7.1924	3.93814	4.816	6.4311	2.075	4.209	5.323	5.127	3.873	5.455	4.55	4.148	4.148	7.028	3.641	4.508	6.813	2.718	7.116	0	6.397	6.146
MOCT	170.9	5.779184	1.1016	5.42334	1.881	2.3187	4.371	2.921	1.806	3.388	4.798	5.292	2.003	2.5	2.5	1.491	4.275	4.32	0.992	5.465	1.412	6.397	0	1.687
EL CEN	171.3	6.5095055	2.7165	6.24629	1.405	0.6707	4.366	3.748	3.035	4.602	5.627	6.479	1.724	2.016	2.016	3.177	5.028	5.337	1.076	5.961	1.127	6.146	1.687	0

A través del análisis donde se consideraron las distancias del centro de distribución proporcionado y cada ubicación se obtuvieron resultados de más de 100 Km, lo que provocaría largas rutas y mayor tiempo de envíos para el modelo de ruteo. Las ubicaciones se muestran en el gráfico 2 así como el centro de distribución actual, y las instituciones educativas seleccionadas.

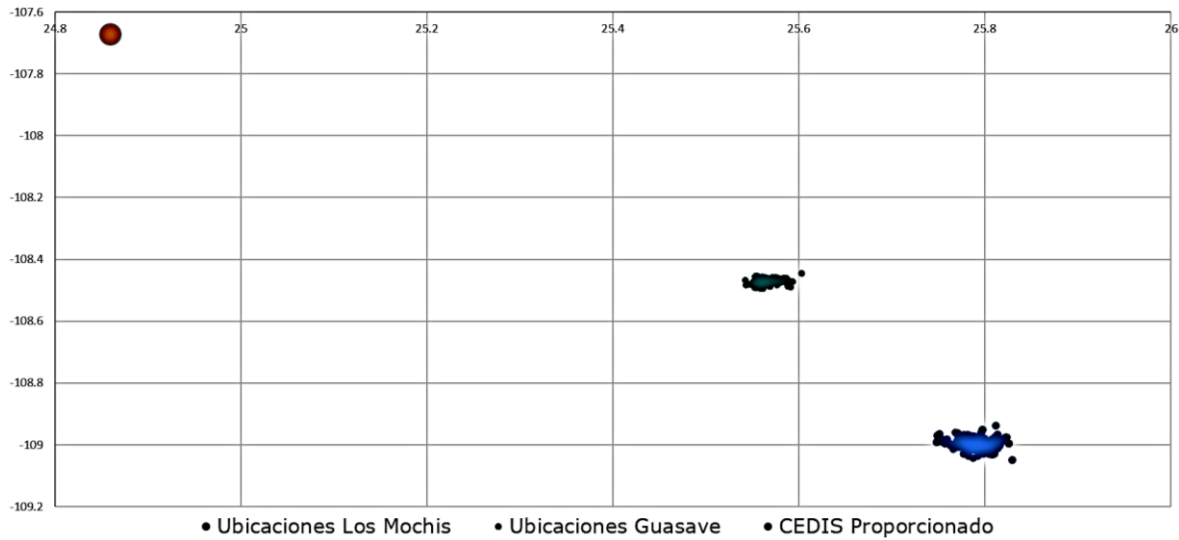


Gráfico 2. Ubicaciones

Con base en este último escenario, se planteó la localización de almacenes intermedios para realizar el ruteo y generar una mayor eficiencia en la distribución considerando entonces un CEDIS por cada municipio en donde se encuentran las instituciones educativas.

Se realizó el cálculo de las ubicaciones para la distribución mediante la técnica de centro de gravedad obteniendo como resultado la ubicación con las coordenadas geográficas de 25.566431 latitud y -108.47024 longitud, ubicación que corresponde al municipio de Guasave bajo los parámetros mostrados en la Tabla 5.

Tabla 5. Calculo de centro de gravedad para ubicación de Guasave

Ubicación de la escuela- localidad al Oeste del Meridiano de Greenwich, expresada en grados	Ubicación de la escuela-localidad al norte del Ecuador, expresada en grados	$(x_i w_i)$	$(y_i w_i)$	$\sum_{i=1}^n w_i$	$\sum_{i=1}^n (x_i w_i)$	$\sum_{i=1}^n (y_i w_i)$
-108.454045	25.554641	2632.12802	-11170.7666	12325	315106.259	-1336895.65
-108.481947	25.560412	6236.74053	-26469.5951			
-108.469828	25.587888	4068.47419	-17246.7027			
-108.459244	25.575751	1534.54506	-6507.55464			
-108.472985	25.586371	1074.62758	-4555.86537			
-108.462619	25.557705	536.711805	-2277.715			
-108.487472	25.568773	4755.79178	-20178.6698			
-108.462619	25.557705	9890.83184	-41975.0336			
-108.471036	25.551438	1098.71183	-4664.25455			
-108.468408	25.563859	10762.3846	-45665.1998			
-108.468408	25.563859	18303.723	-77663.3801			
-108.472128	25.56775	6826.58925	-28962.0582			
-108.454143	25.553321	4829.57767	-20497.833			
-108.469265	25.575776	4578.0639	-19415.9984			
-108.470247	25.578486	3274.04621	-13884.1916			
-108.462221	25.56876	3502.92012	-14859.3243			
-108.461514	25.583808	4093.40928	-17353.8422			
				CEDIS Guasave		
				CGx 25.5664308		
				CGy -108.470235		

Esta ubicación de CEDIS calculada mediante el modelo de centro de gravedad mostro una mejoría para la distribución. Como se representa en el gráfico 3 la localización de CEDIS en Guasave reduce significativamente las distancias entre las demás ubicaciones.

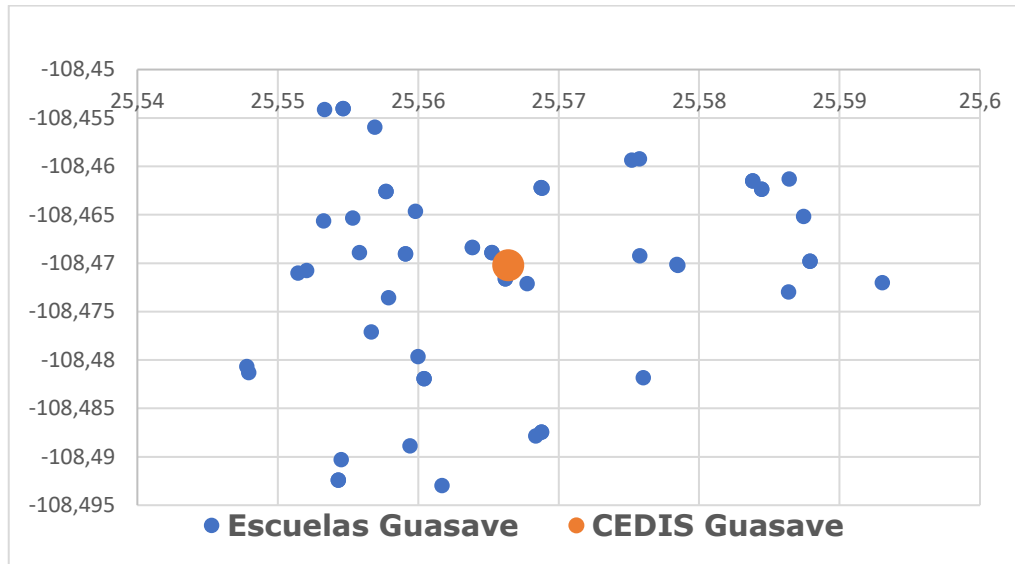


Gráfico 3. Localización de CEDIS para Guasave

Posteriormente, se realizó el cálculo para ubicar el CEDIS para el municipio de Los Mochis. Como resultado del segundo cálculo del modelo del centro de gravedad se obtuvo la ubicación con las coordenadas 25.78680275 latitud y -108.9962085 longitud, de manera particular los parámetros utilizados se muestran en la Tabla 6.

Tabla 6. Cálculo de centro de gravedad para Los Mochis

Ubicación de la escuela- localidad al Oeste del Meridiano de Greenwich, expresada en grados	Ubicación de la escuela-localidad al norte del Ecuador, expresada en grados	$(x_i w_i)$	$(y_i w_i)$	$\sum_{i=1}^n w_i$	$\sum_{i=1}^n (x_i w_i)$	$\sum_{i=1}^n (y_i w_i)$
-108.965898	25.777587	3505.75183	-14819.3621	39610	1021415.257	-4317339.82
-109.011015	25.813653	3975.30256	-16787.6963			
-108.967375	25.781728	360.944192	-1525.54325			
-109.016432	25.787631	1856.70943	-7849.1831			
-109.034483	25.792873	3275.69487	-13847.3793			
-108.993979	25.770202	5360.20202	-22670.7476			
-108.991024	25.789906	2914.25938	-12315.9857			
-108.998205	25.799243	2579.9243	-10899.8205			
-108.982251	25.797818	11583.2203	-48933.0307			
-108.973163	25.783913	5595.10912	-23647.1764			
-108.963374	25.795435	3172.83851	-13402.495			
-109.013394	25.78658	1650.34112	-6976.85722			
-109.01359	25.78208	7322.11072	-30959.8596			
-109.01359	25.78208	18640.4438	-78816.8256			
-109.004463	25.813739	2916.95251	-12317.5043			
-108.979368	25.783696	8405.4849	-35527.274			
-108.974961	25.790646	3791.22496	-16019.3193			
-109.025155	25.803971	3380.3202	-14282.2953			
-108.973897	25.772453	10308.9812	-43589.5588			
				CEDIS Los Mochis		
				CGx 25.7868		
				CGy -108.9962		

De forma gráfica la representación del centro de gravedad para Los Mochis y específicamente del CEDIS resultante se muestra en el gráfico 4.

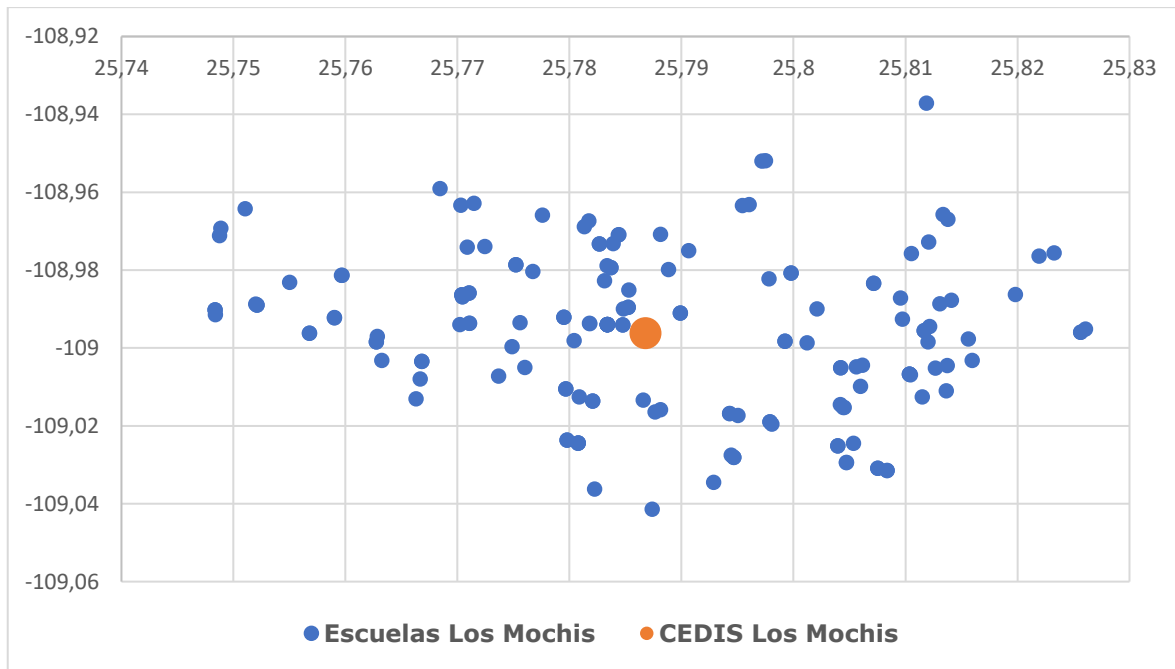


Gráfico 4. Localización de CEDIS para Los Mochis

Con el propósito de conectar los CEDIS de Los Mochis y Guasave se realizó el planteamiento para ubicar un almacén adicional que vincule a los otros dos usando el método de centro de gravedad considerando la demanda de ambos municipios, donde se obtuvo la ubicación correspondiente con coordenadas 25.73450499 latitud y -108.8713867 longitud, los parámetros se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7. Cálculo del centro de gravedad para CEDIS intermedio

$(x_i w_i)$	$(y_i w_i)$	Demanda	$(x_i w_i)$	$(y_i w_i)$
3505.751832	-14819.36213	51935	1336521.516	-5654235.467
3975.302562	-16787.69631	$\sum_{i=1}^n w_i$	$\sum_{i=1}^n (x_i w_i)$	$\sum_{i=1}^n (y_i w_i)$
360.944192	-1525.54325			
1856.709432	-7849.183104			
3275.694871	-13847.37934			
5360.202016	-22670.74763			
2914.259378	-12315.98571			
2579.9243	-10899.8205			
11583.22028	-48933.0307			
5595.109121	-23647.17637			
3172.838505	-13402.495			
1650.34112	-6976.857216			
7322.11072	-30959.85956			
18640.44384	-78816.82557			
2916.952507	-12317.50432			
8405.484896	-35527.27397			
3791.224962	-16019.31927			
3380.320201	-14282.29531			

CEDIS Intermedio	
CGx	25.734505
CGy	-108.87139

De manera grafica las ubicaciones de los tres CEDIS propuestos se muestra en el gráfico 5.

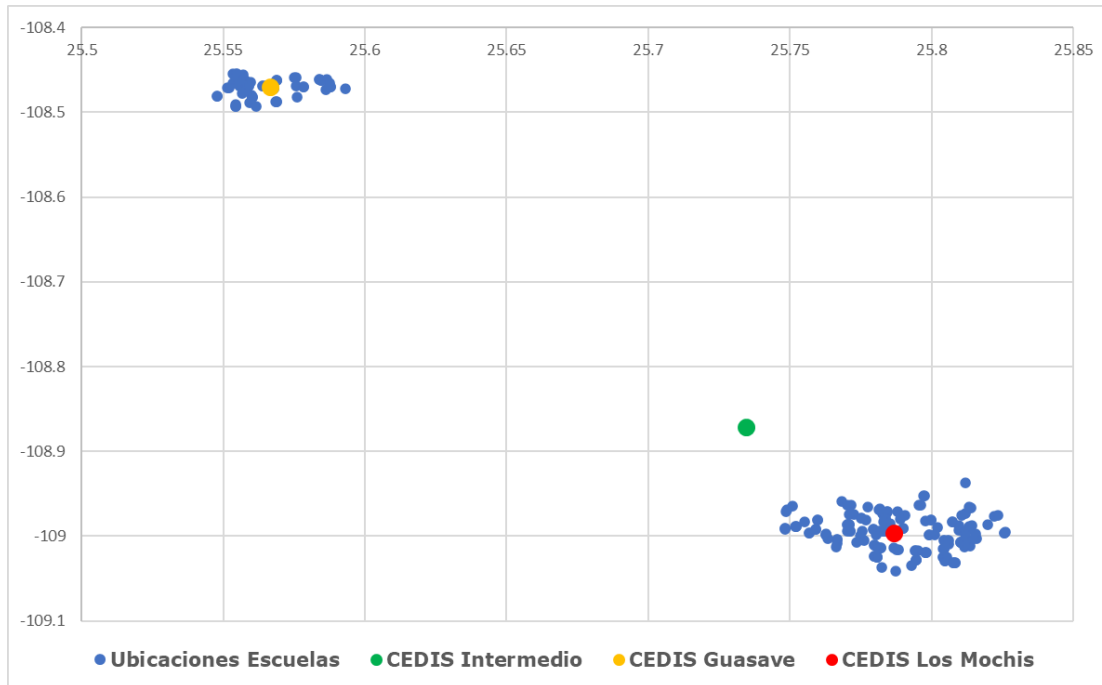


Gráfico 5. Localización de CEDIS intermedio

Posteriormente a que se determinaron las ubicaciones de los CEDIS, se realizó la clasificación mediante la técnica de agrupamiento mediante clúster con características similares y que sirve como base para posteriormente asignar las rutas.

El análisis de clúster se realizó en el software IBM SPSS utilizando los procedimientos estadísticos que ofrece esta herramienta para el desarrollo de clusters. En particular se eligió IBM SPSS porque incluyen todas las facetas del ciclo de vida analítico, desde la elaboración y gestión de datos hasta el análisis y la generación de informes (Field, 2024).

Para la introducción de la base de datos se retomaron las clasificaciones de grupos de cada variable asignando un código de datos de tipo ordinal. La clasificación se muestra en la Tabla 8. Asignación de código para base de datos.

Tabla 8. Asignación de código para base de datos

Variable	Clasificación	Código
Tipo escuela	Inicial	1
	Básica	2
	Media Superior	3
	Superior	4
Matricula	0-100	1
	101-300	2
	301-500	3
	501-700	4
	701 o mas	5
Infraestructura	Baja	1
	Media	2
	Buena	3

	Excelente	4
Nivel educativo	Inicial	1
	Preescolar	2
	Primaria	3
	Secundaria	4
	Bachillerato	5
	Licenciatura	6
Orientación	Público	1
	Privado	2
Localidad	Los Mochis	1
	Guasave	2
Turno	Matutino	1
	Vespertino	2

El clúster se realizó incluyendo todas las variables que se presentan en la Tabla 7 para cada localidad por separado obteniendo como resultado 6 clusters en Los Mochis y 3 Clusters en Guasave. La gráfica 6 y 7 muestran de forma como se realizó la asignación de ubicaciones por cluster.

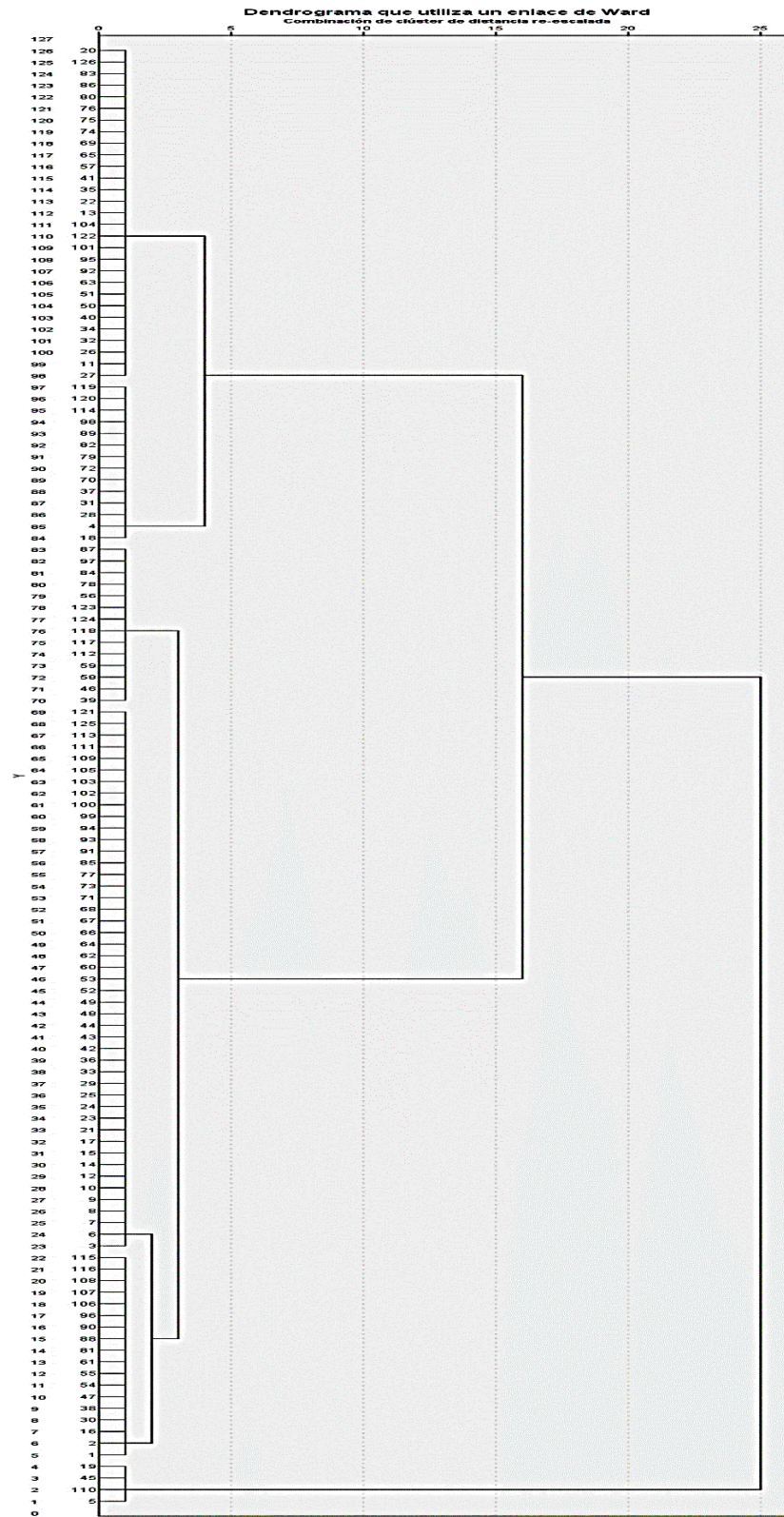


Gráfico 6. Dendrograma Los Mochis

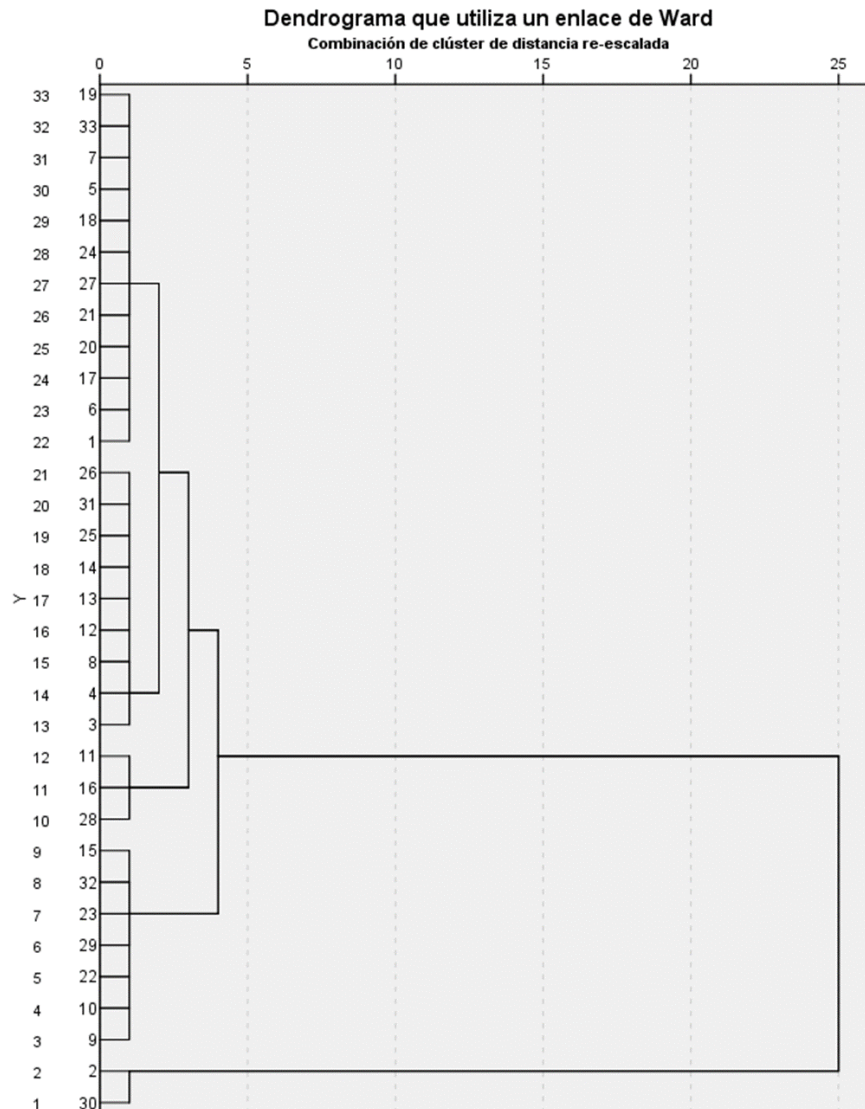


Gráfico 7. Dendrograma Guasave

Finalmente, para desarrollar la solución de ruteo se utilizó el procedimiento heurístico para solucionar problemas de enrutamiento propuesto mediante el algoritmo de Clarke & Wright (Método de ahorros).

Para efectuar el método de ahorros en el diseño de las rutas fue necesario calcular las distancias entre cada ubicación y el centro de distribución correspondiente mediante una matriz simétrica para el cálculo de distancias a cada cluster, posteriormente se aplicó el método de ahorros en cada cluster generado para calcular los ahorros de cada ruta.

Se consideraron las siguientes restricciones para el modelo:

1 ración cubre 1 unidad de la demanda.

Capacidad máxima del vehículo 705 raciones.

Como resultado se obtuvieron diez rutas para el municipio de Los Mochis del algoritmo de Clarke & Wright, con las distancias recorridas y la capacidad usada del vehículo correspondiente conforme se muestra en la Tabla 9.

Tabla 9. Rutas para Los Mochis

Ruta	C1_R1	C1_R2	C2_R1	C2_R2	C3_R1	C4_R1	C5_R1	C5_R2	C5_R3	C6_R1
Distancia recorrida (km)	19.83	15.30	10.98	14.69	20.08	11.93	8.63	17.09	13.67	15.81
Capacidad usada (%)	97.87	59.86	81.84	63.12	100	22.7	93.9	91.77	68.65	74.33

De manera grafica las rutas que se desarrollan para este municipio se describen en el gráfico 8.

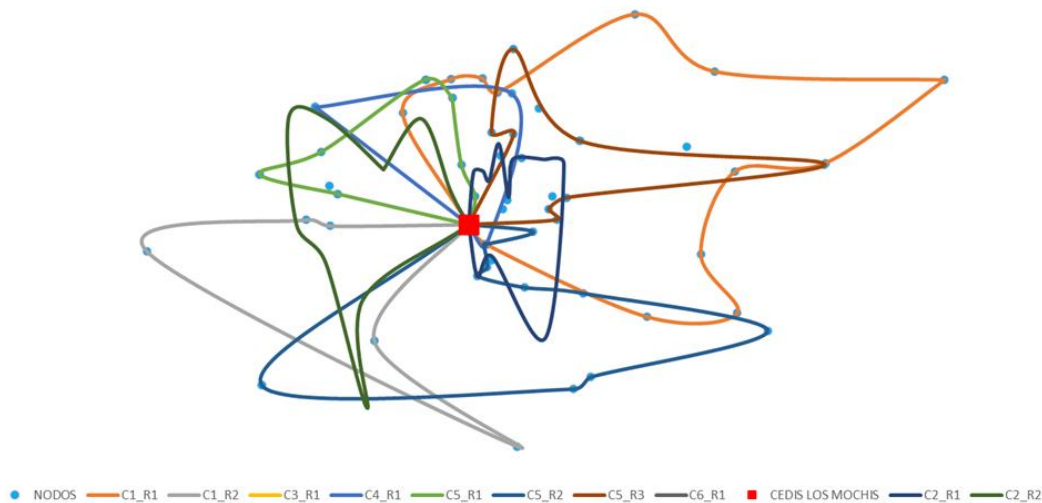


Gráfico 8. Ruteo de vehículos para Los Mochis

Para el caso de Guasave se obtuvieron rutas con las siguientes distancias recorridas y la capacidad usada del vehículo correspondiente (Tabla 10)

Tabla 10. Rutas para Guasave

Ruta	C1_R1	C1_R2	C2_R1
Distancia recorrida (km)	9.72	10.08	6.16
Capacidad usada (%)	81.42	86.10	50.07

En este caso, las rutas de los vehículos se muestran en la Figura 10 para el municipio de Guasave.

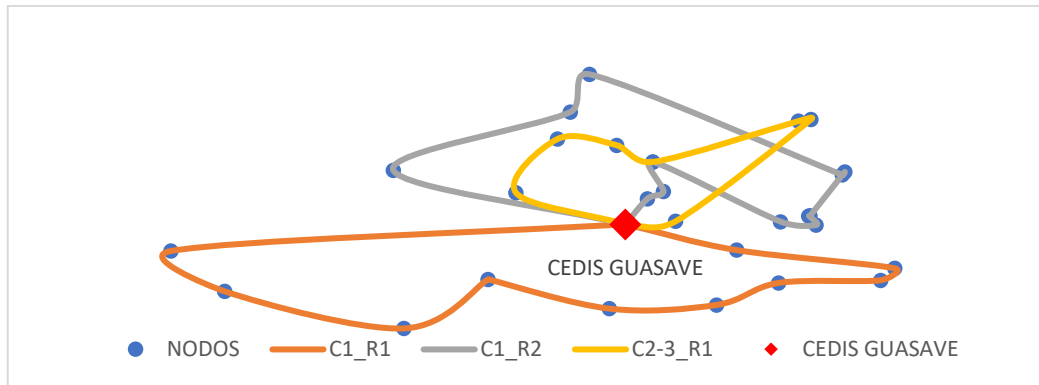


Gráfico 9. Ruteo de vehículos para Guasave

DISCUSIÓN

El enrutamiento de vehículos es un problema el cual no se adapta a todos los métodos existentes para su posible solución debido al nivel de complejidad que presenta, una solución viable para este tipo de planteamientos es utilizar métodos de agrupamiento como el clúster jerárquico facilitando el manejo y solución del problema para posteriormente aplicar un método de solución para el enrutamiento de vehículos con capacidad.

Para este planteamiento se utilizó el método de ahorros de Clarke y Wright el cual ofrece una solución viable en un tiempo considerablemente corto en comparación a otros métodos. La inclusión de variables como tipo de escuela, turno y localidad en la clasificación, junto con la consideración de niveles de infraestructura desde bajo hasta alto, proporciona un enfoque integral para abordar las necesidades educativas y de salud en las instituciones identificadas como prioritarias.

La localización de instalaciones y el enrutamiento de vehículos son elementos clave para mejorar la eficiencia, reducir costos y garantizar una distribución eficiente en operaciones logísticas complejas. La integración estratégica de estos aspectos contribuye significativamente a la optimización de la cadena de suministro y al cumplimiento de objetivos logísticos en contextos específicos como el mencionado caso de estudio.

LIMITACIONES Y ESTUDIOS FUTUROS

El estudio se circunscribe a la optimización de rutas y localización de instalaciones para la distribución eficiente de alimentos. Los autores se proponen continuar esta línea de investigación, ampliando la población y muestra de estudio.

RECONOCIMIENTO

Los autores agradecen la ayuda y colaboración brindada por los administrativos de las distintos centros de distribución de los alimentos, quienes colaboraron para llevar a cabo exitosamente la fase del trabajo de campo.

CONTRIBUCIÓN DE LOS COAUTORES

José Armando Olvera-Castillo: Diseño teórico, elaboración y aplicación del instrumento de recolección de datos, confección de las tablas y gráficos, elaboración del manuscrito con énfasis en el desarrollo de las discusiones y elaboración de las conclusiones.

Francisca Santana-Robles: Confección de las tablas y gráficos, elaboración del manuscrito con énfasis en el desarrollo de las discusiones y elaboración de las conclusiones

Isaias Simon-Marmolejo: búsqueda de información en las diferentes bases de datos, sistematización de los documentos encontrados por categorías, recogida de información de campo.

Rafael Granillo-Macías: Elaboración y revisión del instrumento de recolección de datos, sistematización de resultados, revisión final del manuscrito. Aplicación de la norma APA

CONCLUSIONES

El enrutamiento de vehículos es un desafío complejo que presenta limitaciones significativas en su resolución mediante métodos convencionales. La complejidad radica en la necesidad de optimizar rutas para múltiples vehículos, considerando capacidades, restricciones y objetivos diversos. Aunque se han desarrollado métodos de solución como el clúster jerárquico, que simplifican la gestión del problema, todavía existen áreas de mejora y trabajos futuros por explorar.

Una de las limitaciones clave es la escalabilidad. A medida que aumenta el tamaño y la complejidad de la flota de vehículos y las demandas de entrega, los métodos tradicionales pueden volverse ineficientes. Los enfoques actuales se centran en optimizaciones locales y pueden no considerar de manera integral la red completa de distribución. Por lo tanto, se requiere investigación adicional para desarrollar algoritmos y técnicas que aborden eficazmente la escalabilidad del problema.

Otra limitación importante es la inclusión de variables adicionales en la optimización del enrutamiento. Si bien se han considerado factores como la capacidad de los vehículos en algunos métodos, la inclusión de variables más complejas, como los horarios de entrega específicos, las restricciones de tiempo y la disponibilidad de recursos, sigue siendo un desafío. Los trabajos futuros podrían enfocarse en la incorporación de estas variables para mejorar la precisión y la eficiencia de las soluciones.

Además, se necesita una mayor integración de tecnologías emergentes, como la inteligencia artificial y el aprendizaje automático, en el diseño de soluciones de enrutamiento de vehículos. Estas tecnologías pueden ofrecer capacidades de predicción y adaptación en tiempo real, lo que permite ajustar las rutas y asignaciones de manera dinámica en respuesta a cambios en las condiciones operativas.

Como trabajos futuros, esta investigación aporta estrategias efectivas de intervención y mejora en la distribución de alimentos.

LIMITACIONES Y ESTUDIOS FUTUROS

En cuanto a los trabajos futuros, la investigación mencionada ofrece una base sólida para desarrollar estrategias efectivas en la distribución de alimentos. Esto incluye la exploración de enfoques más avanzados de optimización de rutas, la integración de datos en tiempo real para la toma de decisiones y la aplicación de tecnologías innovadoras para mejorar la eficiencia y la sostenibilidad de las operaciones logísticas en este ámbito.

RECONOCIMIENTO

Los autores reconocen el apoyo recibido por la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo para la realización de este proyecto de investigación.

CONTRIBUCION DE LOS AUTORES

Cuadro resumen de la contribución de los coautores

Coautores	Actividades
Olvera-Castillo J. Armando	Definición de tema. Interpretación y análisis de resultados
Granillo-Macías Rafael	Busqueda de información. Elaboración de la base de datos
Santana-Robles Francisca	Redacción del artículo. Reporte de resultados
Simon-Marmolejo Isaías	Estudio, interpretación crítica y resumen de los textos

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arango Serna, M. D., Gil Gómez, H., & Zapata Cortés, J. A. (2009). Logística esbelta aplicada al transporte en el sector minero. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, (25), 121-136.
- Ballou, R. H. (2004). *Logística: Administración de la cadena de suministro*. Pearson educación.
- Bayu, Irwanto., Sawarni, Hasibuan. (2018). Determination of Pharmaceutical Industrial Distribution Center Location Using Center of Gravity Method: Case Study at PT Jkt. 10(3):228-239. doi: 10.22441/OE.V10.3.2018.003
- Bertha, Maya, Sopha., Anna, Maria, Sri, Asih., Frendy, Dimas, Pradana., Hendra, Edi, Gunawan., Yuni, Karuniawati. (2016). Urban distribution center location: Combination of spatial analysis and multi-objective mixed-integer linear programming. *International journal of engineering business management*, doi: 10.1177/1847979016678371
- Dauni, P., Firdaus, M. R., Asfariani, R., Saputra, M. I. N., Hidayat, A. A., & Zulfikar, W. B. (2019). Implementation of Haversine formula for school location tracking. *Journal Of Physics: Conference Series*, 1402(7), 077028. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1402/7/077028>
- Daza, J. M., Montoya, J. R., & Narducci, F. (2009). Resolución del problema de enrutamiento de vehículos con limitaciones de capacidad utilizando un procedimiento metaheurístico de dos fases. *Revista EIA*, (12), 23-38.
- Carrasco, F., Heine., Antonia, Demleitner., Jannik, Matuschke. (2021). Bifactor Approximation for Location Routing with Vehicle and Facility Capacities. *arXiv: Discrete Mathematics*.
- Fernández, C. G. (2011). Programación lineal e Ingeniería Industrial: una aproximación al estado del arte. *Ingeniería Industrial. Actualidad y nuevas tendencias*, 2(6), 61-78.
- Field, A. (2024). *Discovering statistics using IBM SPSS Statistics*. SAGE Publications Limited.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations, 'School Food and Nutrition. Healthy food Environment and School Food', < <https://www.fao.org/school-food/areas-work/food-environment/es/> >, consultado el 04 marzo 2024.
- García, J. J. B., Hernández, E. H., & Aleksovski, D. (2013). El problema del enrutamiento de vehículos. Propuestas para la búsqueda del camino más corto. Aplicación al entorno docente y Pymes. *Rect@: Revista Electrónica de Comunicaciones y Trabajos de ASEPUMA*, 4(1), 25-42.
- Granillo-Macías, R. (2021). Logistics optimization through a social approach for food distribution. *Socio-Economic Planning Sciences*, 76, 100972.

- Gutiérrez Mite, Ronald Abelino (2018). Diseño de ruteo vehicular con ventanas de tiempo aplicando el algoritmo Clarke & Wright para una empresa que comercializa insumos y dispositivos médicos. Trabajo final para la obtención del título de: Magíster en Logística y transporte, mención modelos de optimización. Espol. FCNM, Guayaquil.
- Haris, Aziz., Hau, Chan., Barton, E., Lee., Bo, Li., Toby, Walsh. (2019). Facility Location Problem with Capacity Constraints: Algorithmic and Mechanism Design Perspectives. arXiv: Computer Science and Game Theory
- Jannik, Castenow., Björn, Feldkord., Till, Knollmann., Manuel, Malatyali., Friedhelm, Meyer, auf, der, Heide. (2020). The Online Multi-Commodity Facility Location Problem. arXiv: Data Structures and Algorithms
- Krishna, Veer, Tiwari., Satyendra, Kumar, Sharma. (2023). An optimization model for vehicle routing problem in last-mile delivery. Expert systems with applications, doi: 10.1016/j.eswa.2023.119789
- Tadaros, M., Athanasios, Migdalas. (2022). Bi- and multi-objective location routing problems: classification and literature review. Operational Research, 22(5):4641-4683. doi: 10.1007/s12351-022-00734-w
- Murray, M. (2018). Route Planning for Logistics and Distribution Companies. Recuperado de <https://www.thebalancesmb.com/route-planning-2221322>
- Nikolaos, Liapis., George, Nenes. (2023). Solving a heterogeneous fleet multi-compartment vehicle routing problem:a case study. International Journal of Systems Science: Operations & Logistics, 10(1) doi: 10.1080/23302674.2023.2190474
- Okan, Arslan. (2021). The location-or-routing problem. Transportation Research Part B-methodological, 147:1-21. doi: 10.1016/J.TRB.2021.02.010
- Olivera, A. (2004). Heurística para problemas de ruteo de vehículos.Montevideo, Uruguay. Obtenido de <http://www.fing.edu.uy/inco/pedeciba/bibliote/reptec/TR0408.pdf>
- Tordecilla, R., Javier, Panadero., Angel, A., Juan., Carlos, L., Quintero-Araujo., Jairo, R., Montoya-Torres. (2020). A Simheuristic Algorithm for the Location Routing Problem with Facility Sizing Decisions and Stochastic Demands. 1265-1275. doi: 10.1109/WSC48552.2020.9384053
- Shamah-Levy, Teresa (2020). Encuesta Nacional de Salud y Nutrición 2020 sobre Covid 19: Resultados nacionales, Instituto Nacional de Salud Pública, México, 2020, pp. 154-174
- Sreesankar, Ajayan., Anandhu, Dileep., Aravind, Mohan., Georg, Gutjahr., KR, Sreeni., Prema, Nedungadi. (2019). Vehicle Routing and Facility-Location for Sustainable Lemongrass Cultivation. 1-6. doi: 10.1109/ISED48680.2019.9096219
- Vilà-Baños, R. Rubio-Hurtado, M. J., Berlanga-Silvente, V., y Torrado-Fonseca, M. (2014). Cómo aplicar un cluster jerárquico en SPSS. [En línea] REIRE, Revista d'Innovació i Recerca en Educació, 7 (1), 113-127. Accesible en: <http://www.ub.edu/ice/reire.htm>
- Yi, Mei., Mengjie, Zhang. (2023). Learning to Select Initialisation Heuristic for Vehicle Routing Problems. doi: 10.1145/3583131.3590397
- Yuan, Liu., Heshan, Zhang., Tao, Xu., Yaping, Chen. (2022). A Heuristic Algorithm Based on Travel Demand for Transit Network Design. Sustainability, 14(17):11097-11097. doi: 10.3390/su141711097