

# Proyecto Fordecyt 291766: Plataforma logística como elemento detonador del desarrollo en el Istmo de Tehuantepec

## Producto 1

Repositorio digital de modelos de logística territorial para la reconfiguración de las redes de distribución asociadas a las principales cadenas de suministro de la región.

Mayo 2019

## FICHA DE ENTREGABLE

**Título del Informe:** Plataforma logística como elemento detonador del desarrollo en el Istmo de Tehuantepec

**Nombre del entregable al cual pertenece:** Repositorio digital de modelos de logística territorial para la reconfiguración de las redes de distribución asociadas a las principales cadenas de suministro de la región

**Objetivo principal planteado:** Identificar un conjunto de modelos de localización de instalaciones, cobertura, redes y distribución que puedan contribuir a mejorar el desempeño de las cadenas de suministro de la región del Istmo de Tehuantepec en el mediano o largo plazo.

**Alcance del documento:** El repositorio digital consistió en una revisión sistemática de la literatura para la identificación, clasificación de modelos asociados a la toma de decisiones para la reconfiguración de redes de distribución clasificados en cuatro categorías principales: 1) localización; 2) cobertura; 3) diseño de cadenas de suministro o redes; y 4) Distribución. A fin de no trasgredir los derechos de autor, el repositorio está integrado por una descripción general de cada una de las categorías previamente referidas y de una relación con los nombres de los artículos científicos y su Identificador de Objeto Digital (DOI -por sus siglas en inglés –*Digital Object Identifier*). Este repositorio será de utilidad para académicos interesados en conocer e identificar modelos y métodos asociados a la toma de decisiones en cadenas de suministro y a tomadores de decisiones interesados en explorar alternativas científicas para darle soporte a las decisiones asociadas a sus negocios o cadenas de suministro.

**Instituciones participantes:** CentroGeo y CIATEJ

<b>Investigadores:</b>	<b>Contacto:</b>
Ma. Loecelia Guadalupe Ruvalcaba Sánchez	<a href="mailto:lruvalcaba@centrogeo.edu.mx">lruvalcaba@centrogeo.edu.mx</a>
Dr. Néstor Miguel Cid García	<a href="mailto:ncid@centrogeo.edu.mx">ncid@centrogeo.edu.mx</a>
Dr. Juan Gabriel Correa Medina	<a href="mailto:gcorrea@centrogeo.edu.mx">gcorrea@centrogeo.edu.mx</a>
Dr. Yair Romero Romero	<a href="mailto:yromero@ciatej.mx">yromero@ciatej.mx</a>

## Contenido

Modelos de Localización .....	1
Modelos de Cobertura .....	8
Diseño de Cadena de Suministro .....	16
Modelos de Distribución .....	29

## Modelos de Localización

En este problema se tiene un conjunto de ubicaciones de clientes con demandas conocidas y un conjunto de ubicaciones candidatas en donde se pueden establecer las instalaciones. Si se desea ubicar una instalación en un sitio candidato entonces se incurre en un costo fijo asociado a la ubicación. Además, existe un costo de envío unitario conocido entre cada sitio candidato y la ubicación de cada cliente. El objetivo de este problema es encontrar la ubicación de las instalaciones y el patrón de envío entre las instalaciones y los clientes, de manera que se minimicen los costos de ubicación y de envío, sujeto al requisito de que se cumplan todas las demandas de los clientes. La notación utilizada para el modelo es la siguiente:

### Índices

- $I$ : denota el conjunto de ubicaciones de los clientes, donde  $(i = 1, 2, \dots, I)$ .  
 $J$ : denota el conjunto de sitios para ubicar las instalaciones, donde  $(j = 1, 2, \dots, J)$ .

### Parámetros

- $c_{ij}$ : es el costo unitario por enviar productos entre el sitio  $j$  y el cliente  $i$ .  
 $h_i$ : es la cantidad de demanda del cliente en la ubicación  $i$ .  
 $f_j$ : es el costo fijo por ubicar una instalación en el sitio candidato  $j$ .

### Variables

$$x_j = \begin{cases} 1 & \text{Si una instalación es ubicada en el sitio } j. \\ 0 & \text{En otro caso.} \end{cases}$$

$y_{ij}$  = cantidad de demanda del cliente  $i$  servida por la instalación del sitio  $j$ .

### Formulación Matemática

$$\text{Minimizar } z = \sum_{i \in I} h_i c_{ij} y_{ij} + \sum_{j \in J} f_j x_j \quad (1)$$

$$\text{Sujeto a: } \sum_{j \in J_i} y_{ij} = 1 \quad \forall i \in I \quad (2)$$

$$y_{ij} - x_i \leq 0 \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (3)$$

$$x_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in J \quad (4)$$

$$y_{ij} \geq 0 \quad i \in I, \forall j \in J \quad (5)$$

donde la función objetivo (1) minimiza el costo total (costo de envío + costo fijo) de configurar y operar la red. Las restricciones en las ecuaciones (2) determinan que la

demanda de cada nodo es completamente asignada. En (3) se asegura que la demanda de cada cliente es asignada solamente a instalaciones abiertas. En (4) y (5) se determina la naturaleza de las variables utilizadas en el modelo. Para este caso, se asume que la capacidad de las instalaciones es infinita.

### Áreas de aplicación

- Industria ladrillera.
- Seguridad.
- Instalaciones públicas (Bomberos).
- Ubicaciones no deseadas.
- Telecomunicaciones.
- Logística inversa.
- Empresas de servicios.
- Rastros.
- Terminales de transporte.
- Centros comerciales.
- Estaciones de ferrocarril.
- Centros logísticos.

### Artículos de referencia:

Título	Digital Object Identifier (DOI)
A bicriteria model for locating a semi-desirable facility in the plane	<a href="https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00251-8">https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00251-8</a>
A bi-objective uncapacitated facility location problem	<a href="https://doi.org/10.1016/S0377-2217(96)00168-3">https://doi.org/10.1016/S0377-2217(96)00168-3</a>
A BSSS algorithm for the single facility location problema in two regions with different norms	<a href="https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.06.004">https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.06.004</a>
A comparison of Lagrangean and surrogate relaxations for the maximal covering location problem	<a href="https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00171-X">https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00171-X</a>
A competitive facility location model with elastic demand and patronising behaviour sensitive to location, price and waiting time	<a href="https://doi.org/10.1504/IJLSM.2011.043119">https://doi.org/10.1504/IJLSM.2011.043119</a>
A continuous location model for siting a non-noxious undesirable facility within a geographical region	<a href="https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00216-7">https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00216-7</a>
A dynamic programming heuristic for the P-median problem	<a href="https://doi.org/10.1016/S0377-2217(96)00218-4">https://doi.org/10.1016/S0377-2217(96)00218-4</a>

Título	Digital Object Identifier (DOI)
A fuzzy simple additive weighting system under group decision-making for facility location selection with objective/subjective attributes	<a href="https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.05.006">https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.05.006</a>
A gamma heuristic for the p-median problem	<a href="https://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00268-9">https://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00268-9</a>
A genetic algorithm approach to solving the anti-covering location problem	<a href="https://doi.org/10.1111/j.1468-0394.2006.00407.x">https://doi.org/10.1111/j.1468-0394.2006.00407.x</a>
A geometrical solution for quadratic bicriteria location models	<a href="https://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00187-8">https://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00187-8</a>
A hybrid heuristic for the uncapacitated hub location problem	<a href="https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00286-5">https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00286-5</a>
A hypermarket site selection model using the grey multi-objective decision method	<a href="https://doi.org/10.1504/IJLSM.2006.008218">https://doi.org/10.1504/IJLSM.2006.008218</a>
A knowledge-based genetic algorithm for a capacitated fuzzy p-hub centre network under uncertain information	<a href="https://doi.org/10.1111/exsy.12262">https://doi.org/10.1111/exsy.12262</a>
A Lagrangean relax-and-cut approach for the two-stage capacitated facility location problem	<a href="https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00300-8">https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00300-8</a>
A linear program for the two-hub location problem	<a href="https://doi.org/10.1016/S0377-2217(96)00233-0">https://doi.org/10.1016/S0377-2217(96)00233-0</a>
A location-routing problem for the conversion to the “click-and-mortar” retailing: The static case	<a href="https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.01.048">https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.01.048</a>
A logit-based model for facility placement planning in supply chain management	<a href="https://doi.org/10.1504/IJLSM.2015.065976">https://doi.org/10.1504/IJLSM.2015.065976</a>
A model for supply chain networks	<a href="https://doi.org/10.26634/jmgt.1.4.382">https://doi.org/10.26634/jmgt.1.4.382</a>
A Multicriteria Warehouse Location Model	<a href="https://doi.org/10.1108/eb014482">https://doi.org/10.1108/eb014482</a>
A multi-objective logistics model for a capacitated service facility problem	<a href="https://doi.org/10.1108/09600039910253887">https://doi.org/10.1108/09600039910253887</a>
A multi-objective model for locating fire stations	<a href="https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00247-6">https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00247-6</a>
A multiperiod two-echelon multicommodity capacitated plant location problem	<a href="https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00256-8">https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00256-8</a>

Título	Digital Object Identifier (DOI)
A new assignment rule to improve seed points algorithms for the continuous k-center problem	<a href="https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00191-4">https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00191-4</a>
A note on the location of an obnoxious facility on a network	<a href="https://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00237-9">https://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00237-9</a>
A reduction result for localtion problems with polyhedral barriers	<a href="https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00399-9">https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00399-9</a>
A repeated matching heuristic for the single-source capacitated facility location problem	<a href="https://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00045-9">https://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00045-9</a>
Algorithms for the robust 1-center problem on a tree	<a href="https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00257-X">https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00257-X</a>
An adaptation of SH heuristic to the location set covering problem	<a href="https://doi.org/10.1016/S0377-2217(96)00181-6">https://doi.org/10.1016/S0377-2217(96)00181-6</a>
An efficient tabu search procedure for the p-Median Problem	<a href="https://doi.org/10.1016/S0377-2217(96)00141-5">https://doi.org/10.1016/S0377-2217(96)00141-5</a>
An exact algorithm for the capacitated facility location problems with single sourcing	<a href="https://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00008-3">https://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00008-3</a>
An exact algorithm for the fuzzy p-median problem	<a href="https://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00330-0">https://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00330-0</a>
An exact method for the two-echelon, single-source, capacitated facility location problem	<a href="https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00105-8">https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00105-8</a>
Analysis of centroid aggregation for the Euclidean distance p-median problem	<a href="https://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00010-1">https://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00010-1</a>
Application of decision analysis techniques to the Weber facility location problem	<a href="https://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00084-8">https://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00084-8</a>
Application of geographical information systems for the optimal location of a commercial network	<a href="https://doi.org/10.1108/EJMBE-07-2017-013">https://doi.org/10.1108/EJMBE-07-2017-013</a>
Coincidence conditions in multifacility location problems with positive and negative weights	<a href="https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00186-0">https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00186-0</a>
Comparing different metaheuristic approaches for the median path problem with bounded length	<a href="https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.07.001">https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.07.001</a>
Determining warehouse number and location in Spain by cluster analysis	<a href="https://doi.org/10.1108/09600039810205962">https://doi.org/10.1108/09600039810205962</a>
Distribution Capacity Planning: The Long-Term Problem	<a href="https://doi.org/10.1108/eb014451">https://doi.org/10.1108/eb014451</a>

Título	Digital Object Identifier (DOI)
Dynamic facility location when the total number of facilities is uncertain: A decision analysis approach	<a href="https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00303-2">https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00303-2</a>
Efficiency in constrained continuous location	<a href="https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00184-7">https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00184-7</a>
Efficient Benders decomposition algorithms for the robust multiple allocation incomplete hub location problem with service time requirements	<a href="https://doi.org/10.1016/j.eswa.2017.10.005">https://doi.org/10.1016/j.eswa.2017.10.005</a>
Efficient solution procedure and reduced size formulations for p-hub location problems	<a href="https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00201-4">https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00201-4</a>
Exact and heuristic algorithms for the uncapacitated multiple allocation p-hub median problem	<a href="https://doi.org/10.1016/S0377-2217(96)00340-2">https://doi.org/10.1016/S0377-2217(96)00340-2</a>
Exact solution methods for uncapacitated location problems with convex transportation costs	<a href="https://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00039-3">https://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00039-3</a>
Generalized p-Center problems: Complexity results and approximation algorithms	<a href="https://doi.org/10.1016/S0377-2217(96)00076-8">https://doi.org/10.1016/S0377-2217(96)00076-8</a>
Heuristic concentration: two stage solution construction	<a href="https://doi.org/10.1016/S0377-2217(96)00100-2">https://doi.org/10.1016/S0377-2217(96)00100-2</a>
Inequality measures and equitable approaches to location problems	<a href="https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00240-4">https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00240-4</a>
Integer programming formulations for three sequential discrete competitive location problems with foresight	<a href="https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.08.041">https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.08.041</a>
Kohonen maps for solving a class of location-allocation problems	<a href="https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00046-5">https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00046-5</a>
Lagrangian heuristics for the two-echelon, single-source, capacitated facility location problem	<a href="https://doi.org/10.1016/S0377-2217(96)00227-5">https://doi.org/10.1016/S0377-2217(96)00227-5</a>
Lagrangian-relaxation-based solution procedures for a multiproduct capacitated facility location problem with choice of facility type	<a href="https://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00303-8">https://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00303-8</a>
Locating least-distant lines in the plane	<a href="https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00254-3">https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00254-3</a>
Locating urban logistics terminals and shopping centres in a Chinese city	<a href="https://doi.org/10.1080/13675567.2011.609159">https://doi.org/10.1080/13675567.2011.609159</a>



Título	Digital Object Identifier (DOI)
Location analysis of logistics centres in Laos	<a href="https://doi.org/10.1080/13675567.2013.812194">https://doi.org/10.1080/13675567.2013.812194</a>
Location of an undesirable facility in a polygonal region with forbidden zones	<a href="https://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00138-6">https://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00138-6</a>
Location of hubs in a competitive environment	<a href="https://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00195-7">https://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00195-7</a>
Locational optimization problems solved through Voronoi diagrams	<a href="https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)80001-X">https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)80001-X</a>
Models for determining depot location	<a href="https://doi.org/10.1108/eb014256">https://doi.org/10.1108/eb014256</a>
Network distance characteristics that affect computational effort in p-median location problems	<a href="https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00336-7">https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00336-7</a>
Network hub location problems: The state of the art	<a href="https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.06.008">https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.06.008</a>
New modeling approaches for the design of local access transport area networks	<a href="https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00325-2">https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00325-2</a>
On the collection depots location problem	<a href="https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00410-5">https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00410-5</a>
On the feasible set for the squared Euclidean Weber problem and applications	<a href="https://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00316-6">https://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00316-6</a>
On the lexicographic minimax approach to location problems	<a href="https://doi.org/10.1016/S0377-2217(96)00154-3">https://doi.org/10.1016/S0377-2217(96)00154-3</a>
On the single-assignment p-hub center problem	<a href="https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00274-X">https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00274-X</a>
Optimal pricing and terminal location for a rail-truck intermodal service – a case study	<a href="https://doi.org/10.1080/13675567.2011.643778">https://doi.org/10.1080/13675567.2011.643778</a>
Optimising multi-objective location decisions in a supply chain using an AHP-enhanced goal-programming model	<a href="https://doi.org/10.1504/IJLSM.2010.03198">https://doi.org/10.1504/IJLSM.2010.03198</a>
Optimising the Location-Allocation Problem with Multiple Objectives	<a href="https://doi.org/10.1108/eb014448">https://doi.org/10.1108/eb014448</a>
Optimum location for export-oriented slaughterhouses in Mato Grosso, Brazil: a dynamic mathematical model	<a href="https://doi.org/10.1080/13675567.2011.608653">https://doi.org/10.1080/13675567.2011.608653</a>
Perception and information in a competitive location model	<a href="https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00137-9">https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00137-9</a>
Projections of the capacitated network loading problem	<a href="https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00083-1">https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00083-1</a>

Título	Digital Object Identifier (DOI)
Promoting cost efficiency and uniformity in parcel delivery centre locations and service areas: a GISbased analysis	<a href="https://doi.org/10.1080/13675567.2015.1090962">https://doi.org/10.1080/13675567.2015.1090962</a>
Sequential location problems	<a href="https://doi.org/10.1016/S0377-2217(96)00216-0">https://doi.org/10.1016/S0377-2217(96)00216-0</a>
Single- and multi-objective defensive location problems on a network	<a href="https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.04.003">https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.04.003</a>
Solving a class of facility location problems using genetic algorithms	<a href="https://doi.org/10.1111/1468-0394.00229">https://doi.org/10.1111/1468-0394.00229</a>
Solving large single allocation p-hub problems with two or three hubs	<a href="https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00370-7">https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00370-7</a>
Solving the Dynamic Warehouse Location Problem	<a href="https://doi.org/10.1108/eb014375">https://doi.org/10.1108/eb014375</a>
Some new algorithms for location problems on networks	<a href="https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00185-9">https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00185-9</a>
Some personal views on the current state and the future of Locational Analysis	<a href="https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00183-5">https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00183-5</a>
Some reverse location problems	<a href="https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00122-8">https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00122-8</a>
Strategic facility location: A review	<a href="https://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00186-6">https://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00186-6</a>
The capacitated multiple allocation hub location problem: Formulations and algorithms	<a href="https://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00395-6">https://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00395-6</a>
The dynamic relocation and phase-out of a hybrid, two-echelon plant/warehousing facility: A multiple objective approach	<a href="https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00166-6">https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00166-6</a>
The fuzzy p-median problem: A global analysis of the solutions	<a href="https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00500-7">https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00500-7</a>
The Location of Facilities With Constraints on Capacities	<a href="https://doi.org/10.1108/eb014357">https://doi.org/10.1108/eb014357</a>
The Logistics of Industrial Location Decisions: An Application of the Analytic Hierarchy Process Methodology	<a href="https://doi.org/10.1080/713682767">https://doi.org/10.1080/713682767</a>
The Multi-Criteria Warehouse Location Problem Revisited	<a href="https://doi.org/10.1108/eb014658">https://doi.org/10.1108/eb014658</a>
The multi-hour service system design problem	<a href="https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00397-5">https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00397-5</a>

Título	Digital Object Identifier (DOI)
The Multiproduct Warehouse Location Problem: Applying a Decomposition Algorithm	<a href="https://doi.org/10.1108/09600039310044858">https://doi.org/10.1108/09600039310044858</a> .
The plant location problem with demand-dependent setup costs and centralized allocation	<a href="https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00361-5">https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00361-5</a>
The p-median problem under uncertainty	<a href="https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.05.045">https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.05.045</a>
The return plant location problem: Modelling and resolution	<a href="https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00192-6">https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00192-6</a>
The uncapacitated multi-period facilities location problem with profit maximization	<a href="https://doi.org/10.1108/09600039910283640">https://doi.org/10.1108/09600039910283640</a>
The Use of Quantitative Techniques in Warehouse Location	<a href="https://doi.org/10.1108/eb014430">https://doi.org/10.1108/eb014430</a>
The weber problem with regional demand	<a href="https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00190-2">https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00190-2</a>
Undesirable facility location with minimal covering objectives	<a href="https://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00335-X">https://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00335-X</a>
Use of location-allocation models in health service development planning in developing nations	<a href="https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00289-1">https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00289-1</a>
Weber problems with alternative transportation systems	<a href="https://doi.org/10.1016/S0377-2217(96)00066-5">https://doi.org/10.1016/S0377-2217(96)00066-5</a>

## Modelos de Cobertura

En el problema de Localización de Máxima Cobertura el objetivo es cubrir (servir) la máxima cantidad de población a partir de una(s) estación(es) de servicio establecida(s), considerando un límite de distancia o tiempo de servicio. Además, se utilizan un número restringido de instalaciones o estaciones de servicio.

La notación matemática para este problema se puede definir de la siguiente manera:

## Índices

$I$ : denota el conjunto de puntos de demanda, donde  $(i = 1, 2, \dots, I)$ .

$J$ : denota el conjunto de sitios para ubicar las instalaciones, donde  $(j = 1, 2, \dots, J)$ .

### Parámetros

$S$ : es la distancia a partir de la cual un punto de demanda es considerado “no cubierto” (si se desea, el valor de máxima distancia  $S$  puede ser escogido de forma diferente para cada punto de demanda).

$d_{ij}$ : es la distancia más corta desde el punto de demanda en el nodo  $i$  hasta la estación de servicio en el nodo  $j$ .

$N_i$ : representa el conjunto de sitios para ubicar las instalaciones, los cuales son elegibles para “cubrir” la demanda del punto  $i$ . La demanda de un nodo es cubierta cuando la instalación más cercana a ese nodo se encuentra a una distancia menor o igual a  $S$ . La demanda del punto  $i$  “no es cubierta” cuando la instalación más cercana a ese nodo se encuentra a una distancia mayor que  $S$ .

$$N_i = \{j \in J \mid d_{ij} \leq S\}.$$

$a_i$ : es la cantidad de población a ser servida en el nodo  $i$ .

$p$ : es el número de instalaciones a ser ubicadas.

### Variables

$$x_j = \begin{cases} 1 & \text{Si una instalación es ubicada en el sitio } j. \\ 0 & \text{En otro caso.} \end{cases}$$

$$y_i = \begin{cases} 1 & \text{Si la demanda del nodo } i \text{ es cubierta por una instalación} \\ & \text{ubicada dentro de la distancia } S. \\ 0 & \text{En otro caso.} \end{cases}$$

### Formulación Matemática

$$\text{Maximizar } z = \sum_{i \in I} a_i y_i \quad (1)$$

$$\text{Sujeto a: } \sum_{j \in N_i} x_j \geq y_i \quad \forall i \in I \quad (2)$$

$$\sum_{j \in J} x_j = P \quad (3)$$

$$x_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in J \quad (4)$$

$$y_i \in \{0,1\} \quad \forall i \in I \quad (5)$$

En la función objetivo Eq. (1) se maximiza el número de personas que adquieren el servicio o son “cubiertas” dentro de la distancia de servicio deseada. Las restricciones en Eq. (2) permiten que  $y_i$  sea igual a 1 solamente cuando una o más instalaciones son establecidas en sitios que se encuentran en el conjunto  $N_i$ , es decir, una o más instalaciones han sido ubicadas dentro de la distancia  $S$  del punto de demanda  $i$ . El número de instalaciones ubicadas es restringido a un valor igual a  $P$ , el cual se representa en las restricciones de la Eq. (3). La solución de este problema determina no solamente la mayor cantidad de población que puede ser cubierta, sino que también se especifica el número  $P$  de instalaciones que logran la máxima cobertura.

Una formulación equivalente al problema de máxima cobertura puede ser derivado al sustituir  $1 - \bar{y}_i = y_i$ , donde:

$$\bar{y}_i = \begin{cases} 1 & \text{Si la demanda del nodo } i \text{ no es cubierta por una instalación} \\ & \text{ubicada dentro de la distancia } S. \\ 0 & \text{En otro caso} \end{cases}$$

Las restricciones en (2) se pueden reescribir como:

$$\sum_{j \in N_i} x_j \geq 1 - \bar{y}_i \quad \forall i \in I$$

Lo cual es equivalente a:

$$\sum_{j \in N_i} x_j + \bar{y}_i \geq 1 \quad \forall i \in I$$

Después de la sustitución de variables, la función objetivo puede ser escrita como:

$$\text{Maximizar } z = \left( \sum_{i \in I} a_i + \sum_{i \in I} -a_i \bar{y}_i \right)$$

Note que la primer sumatoria es una constante conocida. Debido a que la maximización de una cantidad negativa es equivalente a la minimización de una cantidad positiva, entonces la función objetivo puede ser simplificada como:

$$\text{Minimizar } z = \sum_{i \in I} a_i \bar{y}_i$$

En este caso, la función objetivo puede ser interpretada como minimizar el número de gente que no será servida “cubierta” dentro de la distancia de servicio máxima. El modelo completo quedaría de la siguiente manera:

$$\text{Minimizar } z = \sum_{i \in I} a_i \bar{y}_i \quad (1)$$

$$\text{Sujeto a: } \sum_{j \in N_i} x_j + \bar{y}_i \geq 1 \quad \forall i \in I \quad (2)$$

$$\sum_{j \in J} x_j = P \quad (3)$$

$$x_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in J \quad (4)$$

$$\bar{y}_i \in \{0,1\} \quad \forall i \in I \quad (5)$$

Esta versión del problema busca minimizar la población “no cubierta” dado un número  $P$  de instalaciones que son localizadas sobre una red de distribución.

El problema de máxima cobertura ha sido resuelto de manera óptima utilizando diversos métodos de programación lineal y heurísticas. A continuación, se presentan algunas áreas de aplicación y algunos artículos de referencia en donde se pueden encontrar diversas versiones y metodologías de solución del problema.

## 2. Áreas de Aplicación

- Vehículos de emergencia.
- Problemas forestales.
- Servicios de salud.
- Seguridad pública: Áreas de patrullaje de la policía.
- Logística Humanitaria.
- Tecnologías de Información. Redes para sensores inalámbricos.

## 3. Artículos de referencia

Título	Digital Object Identifier (DOI)
A comparison of Lagrangean and surrogate relaxations for the maximal covering location problem	<a href="https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00171-X">https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00171-X</a>
A hybrid metaheuristic algorithm for the multi-depot covering tour vehicle routing problem	<a href="https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.10.048">https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.10.048</a>
A Lagrangean heuristic for the maximal covering location problem	<a href="https://doi.org/10.1016/0377-2217(94)00159-6">https://doi.org/10.1016/0377-2217(94)00159-6</a>
A maximal covering location model in the presence of partial coverage	<a href="https://doi.org/10.1016/S0305-0548(03)00105-9">https://doi.org/10.1016/S0305-0548(03)00105-9</a>

Título	Digital Object Identifier (DOI)
A Maximum Expected Covering Location Model: Formulation, Properties and Heuristic Solution	<a href="https://doi.org/10.1287/trsc.17.1.48">https://doi.org/10.1287/trsc.17.1.48</a>
A multiperiod set covering location model for dynamic redeployment of ambulances	<a href="https://doi.org/10.1016/j.cor.2006.04.003">https://doi.org/10.1016/j.cor.2006.04.003</a>
A note on solutions to the maximal expected covering location problem	<a href="https://doi.org/10.1016/S0305-0548(01)00083-1">https://doi.org/10.1016/S0305-0548(01)00083-1</a>
A probabilistic analysis of the maximal covering location problem	<a href="https://doi.org/10.1016/0166-218X(93)90006-A">https://doi.org/10.1016/0166-218X(93)90006-A</a>
Analysis of Errors Due to Demand Data Aggregation in the Set Covering and Maximal Covering Location Problems	<a href="https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1990.tb00199.x">https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1990.tb00199.x</a>
Applications of the Location Set-covering Problem	<a href="https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1976.tb00529.x">https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1976.tb00529.x</a>
Bike-sharing stations: A maximal covering location approach	<a href="https://doi.org/10.1016/j.tra.2015.09.014">https://doi.org/10.1016/j.tra.2015.09.014</a>
Computational experience with approximation algorithms for the set covering problem	<a href="https://doi.org/10.1016/S0377-2217(96)00161-0">https://doi.org/10.1016/S0377-2217(96)00161-0</a>
Covering problems in facility location: A review	<a href="https://doi.org/10.1016/j.cie.2011.08.020">https://doi.org/10.1016/j.cie.2011.08.020</a>
Covering-Location Models for Emergency Situations That Require Multiple Response Units	<a href="https://doi.org/10.1287/mnsc.36.1.16">https://doi.org/10.1287/mnsc.36.1.16</a>
Determining Optimal Police Patrol Areas with Maximal Covering and Backup Covering Location Models	<a href="https://doi.org/10.1007/s11067-007-9035-6">https://doi.org/10.1007/s11067-007-9035-6</a>
Generalized coverage: New developments in covering location models	<a href="https://doi.org/10.1016/j.cor.2009.11.003">https://doi.org/10.1016/j.cor.2009.11.003</a>
Improving accessibility to rural health services: The maximal covering network improvement problem	<a href="https://doi.org/10.1016/j.seps.2008.02.012">https://doi.org/10.1016/j.seps.2008.02.012</a>
Location Covering Models. History, Applications and Advancements	<a href="https://doi.org/10.1007/978-3-319-99846-6">https://doi.org/10.1007/978-3-319-99846-6</a>
Maximal covering location problem (MCLP) with fuzzy travel times	<a href="https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.05.031">https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.05.031</a>
Maximum coverage capacitated facility location problem with range constrained drones	<a href="https://doi.org/10.1016/j.trc.2018.12.001">https://doi.org/10.1016/j.trc.2018.12.001</a>



Título	Digital Object Identifier (DOI)
Models, solutions and enabling technologies in humanitarian logistics	<a href="https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.11.030">https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.11.030</a>
Modular capacitated maximal covering location problem for the optimal siting of emergency vehicles	<a href="https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2011.11.013">https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2011.11.013</a>
Note—On the Maximal Covering Location Problem and the Generalized Assignment Problem	<a href="https://doi.org/10.1287/mnsc.25.1.107">https://doi.org/10.1287/mnsc.25.1.107</a>
Operations Research challenges in forestry: 33 open problems	<a href="https://doi.org/10.1007/s10479-015-1907-4">https://doi.org/10.1007/s10479-015-1907-4</a>
Optimization models in emergency logistics: A literature review	<a href="https://doi.org/10.1016/j.seps.2011.04.004">https://doi.org/10.1016/j.seps.2011.04.004</a>
Optimizing the spatial location of medical drones	<a href="https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2017.11.009">https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2017.11.009</a>
Probabilistic, Maximal Covering Location—Allocation Models for Congested Systems	<a href="https://doi.org/10.1111/0022-4146.00100">https://doi.org/10.1111/0022-4146.00100</a>
Recent Applications of the Maximal Covering Location Planning (M.C.L.P.) Model	<a href="https://doi.org/10.1057/jors.1986.134">https://doi.org/10.1057/jors.1986.134</a>
Reformulations and Computational Results for the Uncapacitated Single Allocation Hub Covering Problem	<a href="https://doi.org/10.1007/978-3-319-55914-8_10">https://doi.org/10.1007/978-3-319-55914-8_10</a>
Reserve selection as a maximal covering location problem	<a href="https://doi.org/10.1016/0006-3207(95)00102-6">https://doi.org/10.1016/0006-3207(95)00102-6</a>
Solving maximal covering location problem using genetic algorithm with local refinement	<a href="https://doi.org/10.1007/s00500-017-2598-3">https://doi.org/10.1007/s00500-017-2598-3</a>
Solving the maximal covering location problem with heuristic concentration	<a href="https://doi.org/10.1016/j.cor.2006.03.007">https://doi.org/10.1016/j.cor.2006.03.007</a>
Survey on Coverage Problems in Wireless Sensor Networks	<a href="https://doi.org/10.1007/s11277-014-2094-3">https://doi.org/10.1007/s11277-014-2094-3</a>
Tabu based heuristics for the generalized hierarchical covering location problem	<a href="https://doi.org/10.1016/j.cie.2010.01.005">https://doi.org/10.1016/j.cie.2010.01.005</a>
The Benders decomposition algorithm: A literature review	<a href="https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.12.005">https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.12.005</a>

Título	Digital Object Identifier (DOI)
The capacitated maximal covering location problem with backup service	<a href="https://doi.org/10.1007/BF02097800">https://doi.org/10.1007/BF02097800</a>
The Covering Salesman Problem	<a href="https://doi.org/10.1287/trsc.23.3.208">https://doi.org/10.1287/trsc.23.3.208</a>
The generalized maximal covering location problem	<a href="https://doi.org/10.1016/S0305-0548(01)00079-X">https://doi.org/10.1016/S0305-0548(01)00079-X</a>
The gradual covering decay location problem on a network	<a href="https://doi.org/10.1016/S0377-2217(02)00604-5">https://doi.org/10.1016/S0377-2217(02)00604-5</a>
The large scale maximal covering location problem	<a href="https://doi.org/10.1016/j.scient.2011.11.008">https://doi.org/10.1016/j.scient.2011.11.008</a>
The large-scale dynamic maximal covering location problem	<a href="https://doi.org/10.1016/j.mcm.2012.07.028">https://doi.org/10.1016/j.mcm.2012.07.028</a>
The max $p$ -regions problem	<a href="https://doi.org/10.1111/j.1467-9787.2011.00743.x">https://doi.org/10.1111/j.1467-9787.2011.00743.x</a>
The maximal covering location problem	<a href="https://doi.org/10.1111/j.1435-5597.1974.tb00902.x">https://doi.org/10.1111/j.1435-5597.1974.tb00902.x</a>
The Maximal Covering Location Problem with Capacities on Total Workload	<a href="https://doi.org/10.1287/mnsc.37.2.233">https://doi.org/10.1287/mnsc.37.2.233</a>
The maximal expected coverage relocation problem for emergency vehicles	<a href="https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2601991">https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2601991</a>
The maximal expected covering location problem: Revisited	<a href="https://doi.org/10.1287/trsc.23.4.277">https://doi.org/10.1287/trsc.23.4.277</a>
The Maximum Availability Location Problem	<a href="https://doi.org/10.1287/trsc.23.3.192">https://doi.org/10.1287/trsc.23.3.192</a>
The Maximum Coverage Location Problem	<a href="https://doi.org/10.1137/0604028">https://doi.org/10.1137/0604028</a>
The median tour and maximal covering tour problems: Formulations and heuristics	<a href="https://doi.org/10.1016/0377-2217(94)90149-X">https://doi.org/10.1016/0377-2217(94)90149-X</a>
The multiple gradual cover location problem	<a href="https://doi.org/10.1080/01605682.2018.1471376">https://doi.org/10.1080/01605682.2018.1471376</a>
The $p$ -Median Problem	<a href="https://doi.org/10.1007/978-3-319-13111-5_2">https://doi.org/10.1007/978-3-319-13111-5_2</a>
The queuing probabilistic location set covering problem and some extensions	<a href="https://doi.org/10.1016/0038-0121(94)90003-5">https://doi.org/10.1016/0038-0121(94)90003-5</a>
Theoretical and Computational Links between the $p$ -Median, Location Set-covering, and the Maximal Covering Location Problem	<a href="https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1976.tb00547.x">https://doi.org/10.1111/j.1538-4632.1976.tb00547.x</a>

## **Diseño de Cadena de Suministro**

El diseño de redes logísticas es uno de los campos más importantes de la Gestión de la Cadena de Suministro (SCM). Ofrece un gran potencial para reducir costos y mejorar la calidad del servicio. La eficiencia del sistema logístico está influenciada por muchos factores; uno de ellos es decidir la cantidad de centros de distribución (DCs) y, encontrar la buena ubicación para abrirlos, de tal forma que la demanda del cliente pueda satisfacerse al mínimo costo de apertura de los DCs y al costo mínimo de envío. A continuación, se presentan algunos de los modelos básicos utilizados en el diseño de la cadena de suministro.

### **1. Modelo Logístico de Dos Etapas**

El modelo logístico de dos etapas (o problema de transporte en dos etapas: tsTP) determina la red de distribución para satisfacer la demanda de los clientes a un costo mínimo sujeto a la capacidad de la planta y de los DCs y también del número mínimo de DCs que se abrirán. El tsTP se puede definir con las siguientes suposiciones:

- Las ubicaciones de los clientes y su demanda se conocen con anticipación.
- Los números de posibles ubicaciones de DCs y sus capacidades máximas también se conocen.
- Cada instalación tiene una capacidad limitada y existe un límite sobre la cantidad de instalaciones que se abrirán.

La ilustración del problema de la logística en dos etapas y la estructura de la red se muestran en las Figuras 1 y 2.

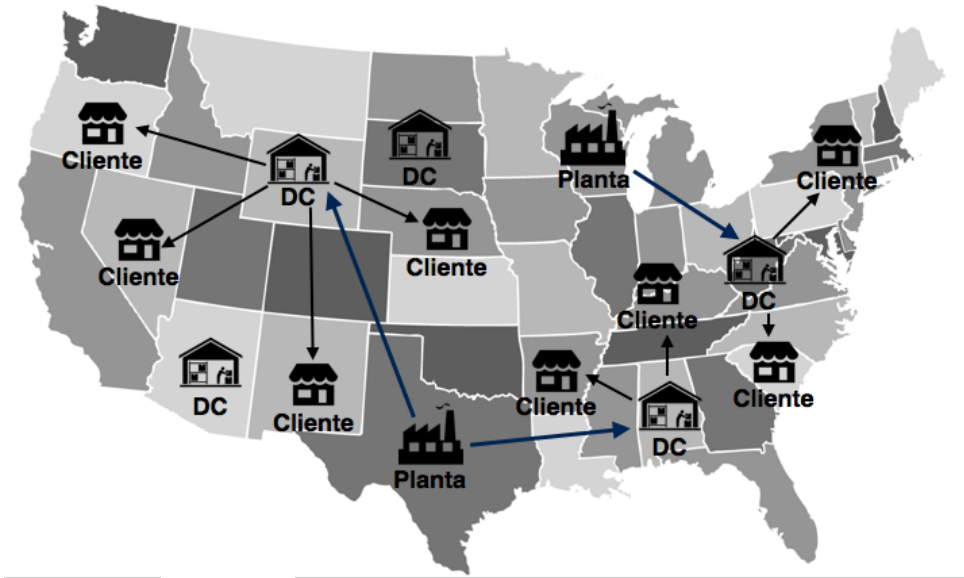


Figura 1: Problema logístico de dos etapas.

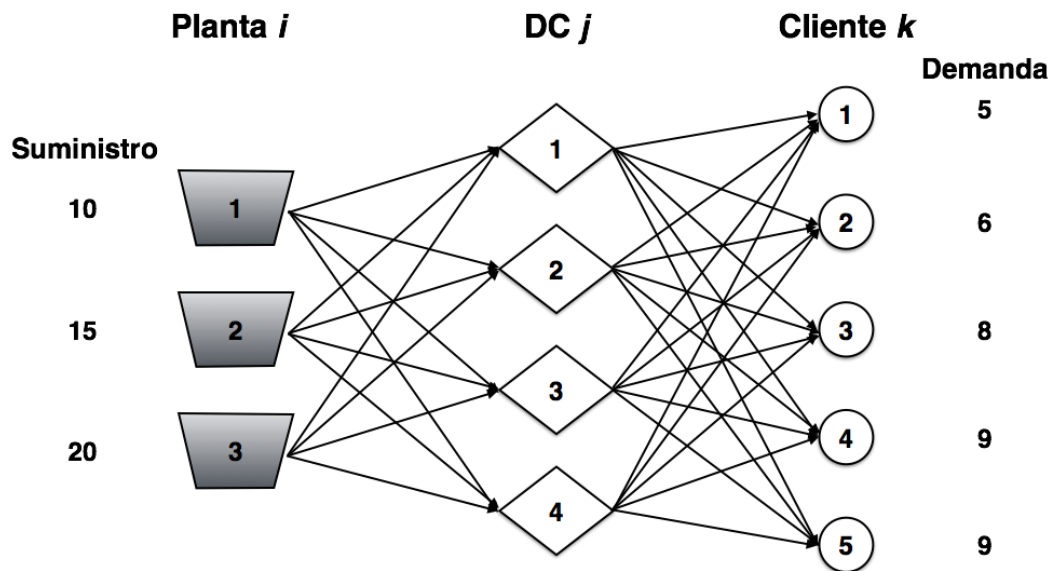


Figura 2: Modelo logístico de dos etapas.

El tsTP incluye el problema de transporte y el problema de ubicación de instalaciones. El problema se conoce como el problema de ubicación de instalaciones  $p$ -mediana capacitado y es un problema NP-Hard. La notación para formular matemáticamente el problema es la siguiente:

## Índices

$I$ : denota el conjunto de plantas, donde  $(i = 1, 2, \dots, I)$ .

$J$ : denota el conjunto de centros de distribución (DC), donde  $(j = 1, 2, \dots, J)$ .

$K$ : denota el conjunto de clientes, donde  $(k = 1, 2, \dots, K)$ .

## Parámetros

$a_i$ : capacidad de la planta  $i$ .

$b_j$ : capacidad del DC  $j$ .

$d_k$ : demanda del cliente  $k$ .

$t_{ij}$ : costo unitario de transportar desde la planta  $i$  hasta el DC  $j$ .

$c_{jk}$ : costo unitario de transportar desde el DC  $j$  hasta el cliente  $k$ .

$f_j$ : costo fijo por abrir el DC  $j$ .

$P$ : límite máximo de DCs que pueden ser abiertos.

## Variables

$x_{ij}$  = cantidad de envío desde la planta  $i$  hasta el DC  $j$ .

$y_{jk}$  = cantidad de envío desde el DC  $j$  hasta el cliente  $k$ .

$$w_j = \begin{cases} 1 & \text{Si el centro de distribución } j \text{ es abierto.} \\ 0 & \text{En otro caso.} \end{cases}$$

## Formulación Matemática

$$\text{Minimizar } z = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} t_{ij} x_{ij} + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} c_{jk} y_{jk} + \sum_{j \in J} f_j w_j \quad (1)$$

$$\text{Sujeto a: } \sum_{j \in J} x_{ij} \leq a_i \quad \forall i \in I \quad (2)$$

$$\sum_{k \in K} y_{jk} \leq b_j w_j \quad \forall j \in J \quad (3)$$

$$\sum_{j \in J} w_j \leq P \quad (4)$$

$$\sum_{j \in J} y_{jk} \geq d_k \quad \forall k \in K \quad (5)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} x_{ij} = \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} y_{jk} \quad (6)$$

$$x_{ij}, y_{jk} \geq 0 \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall k \in K \quad (7)$$

$$w_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in J \quad (8)$$

En la función objetivo (1) se minimizan los costos de envío más los costos por apertura de los centros de distribución. Las restricciones en las Eqs. (2) y (3) se aseguran las limitantes de capacidad de las plantas y de los centros de distribución, respectivamente. En Eq. (4) se garantiza que los DCs abiertos no excedan el máximo permitido. Esta restricción es muy importante cuando un gerente tiene un capital disponible limitado. Las restricciones en Eq. (5) asegura que todas las demandas de los clientes sean satisfechas por los DCs abiertos. Sin pérdida de generalidad, en la Eq. (6) suponemos que este modelo satisface la condición de balance. Un problema desbalanceado se puede cambiar a uno balanceado mediante la introducción de proveedores o clientes ficticios. Las restricciones en las Eqs. (7) y (8) imponen la restricción de no negatividad en las variables de decisión y la naturaleza binaria de las variables de decisión utilizadas en este modelo.

## 2. Modelo Logístico de Tres Etapas

El problema de diseño de redes de cadena de suministro se conoce como de tres etapas cuando son considerados proveedores, plantas, centros de distribución y clientes. Este

problema ha ido ganando importancia debido a la creciente competitividad introducida por la globalización del mercado.

La tarea de diseño implica la decisión de escoger abrir una instalación (planta o DC) o no, y el diseño de la red de distribución para satisfacer la demanda del cliente a un costo mínimo. El modelo de red logística de tres etapas se formula de la siguiente manera:

### Índices

- $I$ : denota el conjunto de proveedores, donde  $(i = 1, 2, \dots, I)$ .
- $J$ : denota el conjunto de plantas, donde  $(j = 1, 2, \dots, J)$ .
- $K$ : denota el conjunto de DCs, donde  $(k = 1, 2, \dots, K)$ .
- $L$ : denota el conjunto de clientes, donde  $(l = 1, 2, \dots, L)$ .

### Parámetros

- $a_i$ : capacidad del proveedor  $i$ .
- $b_j$ : capacidad de la planta  $j$ .
- $c_k$ : capacidad del DC  $k$ .
- $d_l$ : demanda del cliente  $l$ .
- $s_{ij}$ : costo unitario por producir material del proveedor  $i$  en la planta  $j$ .
- $t_{jk}$ : costo unitario de transportar desde la planta  $j$  hasta el DC  $k$ .
- $u_{kl}$ : costo unitario de transportar desde el DC  $k$  hasta el cliente  $l$ .
- $f_j$ : costo fijo por abrir la planta  $j$ .
- $g_k$ : costo fijo por operar el DC  $k$ .
- $W$ : límite máximo de DCs que pueden ser abiertos.
- $P$ : límite máximo de plantas que pueden ser abiertas.

### Variables

$x_{ij}$  = cantidad producida en la planta  $j$  utilizando material del proveedor  $i$ .

$y_{jk}$  = cantidad de envío desde la planta  $j$  hasta el DC  $k$ .

$zz_{kl}$  = cantidad de envío desde el DC  $k$  hasta el cliente  $l$ .

$$w_j = \begin{cases} 1 & \text{Si se produce en la planta } j. \\ 0 & \text{En otro caso.} \end{cases}$$

$$v_k = \begin{cases} 1 & \text{Si el centro de distribución } k \text{ es abierto.} \\ 0 & \text{En otro caso.} \end{cases}$$

## Formulación Matemática

$$\begin{aligned} \text{Minimizar } z = & \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} s_{ij} x_{ij} + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} t_{jk} y_{jk} + \sum_{k \in K} \sum_{l \in L} u_{kl} z_{kl} \\ & + \sum_{i \in I} f_j w_j + \sum_{k \in K} g_k v_k \end{aligned} \quad (9)$$

$$\text{Sujeto a: } \sum_{j \in J} x_{ij} \leq a_i \quad \forall i \in I \quad (10)$$

$$\sum_{k \in K} y_{jk} \leq b_j w_j \quad \forall j \in J \quad (11)$$



$$\sum_{j \in J} w_j \leq P \quad (12)$$

$$\sum_{l \in L} z_{kl} \leq c_k v_k \quad \forall k \in K \quad (13)$$

$$\sum_{k \in K} v_k \leq W \quad (14)$$

$$\sum_{k \in K} z_{kl} \geq d_l \quad \forall l \in L \quad (15)$$

$$v_k, w_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in J, \forall k \in K \quad (16)$$

$$x_{ij}, y_{jk}, z_{kl} \geq 0 \quad \forall i \in I, \forall j \in J, \forall k \in K, \forall l \in L \quad (17)$$

En la función objetivo (9) se minimizan los costos de envío más los costos por apertura de los centros de distribución y de las plantas. Las restricciones en las Eqs. (10) y (11) se aseguran los límites de capacidad de las plantas y de los centros de distribución, respectivamente. En Eq. (12) se garantiza que el número de plantas abiertas no excedan el máximo permitido. Esta restricción es muy importante cuando un gerente tiene un capital disponible limitado. Las restricciones en Eq. (13) determina que sólo se enviará productos a los clientes a partir de centros de distribución que estén abiertos. En Eq. (14) se garantiza que el número de centros de distribución no excedan el máximo permitido. Las restricciones en Eq. (15) asegura que todas las demandas de los clientes sean satisfechas por los DCs abiertos. Las restricciones en las Eqs. (16) y (17) imponen la naturaleza binaria de las variables de decisión utilizadas y la restricción de no negatividad en las variables de decisión en este modelo.

Los problemas de diseño de la cadena de suministro en redes logísticas han sido resueltos utilizando diversos métodos de programación lineal y heurísticas. A continuación, se presentan algunos artículos de referencia en donde se pueden encontrar diversas variaciones del problema, aplicaciones y metodologías de solución.

### 3. Áreas de Aplicación

- Agroindustria.

- Líneas aéreas.
- Logística humanitaria.
- Logística inversa
- Seguridad pública.
- Servicios de salud.
- Transporte.
- Tecnologías de información.

#### 4. Artículos de referencia

Título	Digital Object Identifier (DOI)
A design of distribution network and development of efficient distribution policy	<a href="https://doi.org/10.1504/IJLSM.2011.040062">https://doi.org/10.1504/IJLSM.2011.040062</a>
A framework for an integrated distribution system optimisation model	<a href="https://doi.org/10.1504/IJLSM.2008.017598">https://doi.org/10.1504/IJLSM.2008.017598</a>
A fuzzy bi-objective mixed-integer programming method for solving supply chain network design problems under ambiguous and vague conditions	<a href="https://doi.org/10.1007/s00170-014-5891-7">https://doi.org/10.1007/s00170-014-5891-7</a>
A genetic algorithm approach for the multi-commodity, multi-period distribution planning in a supply chain network design	<a href="https://doi.org/10.1007/978-3-642-17563-3_58">https://doi.org/10.1007/978-3-642-17563-3_58</a>
A hybrid meta-heuristic algorithm for solving real-life transportation network design problems	<a href="https://doi.org/10.1504/IJLSM.2013.055561">https://doi.org/10.1504/IJLSM.2013.055561</a>
A Metaheuristic Approach for Supply Chain Network Design Problems	<a href="https://doi.org/10.1007/978-3-642-30433-0_12">https://doi.org/10.1007/978-3-642-30433-0_12</a>
A model for the management of WEEE reverse logistics	<a href="https://doi.org/10.1504/IJLSM.2010.033888">https://doi.org/10.1504/IJLSM.2010.033888</a>
A Multi-Objective Discrete Particle Swarm Optimisation Algorithm for supply chain network design	<a href="https://doi.org/10.1504/IJLSM.2012.045919">https://doi.org/10.1504/IJLSM.2012.045919</a>
A multi-objective programming approach for designing complicated logistics network	<a href="https://doi.org/10.1504/IJLSM.2011.041864">https://doi.org/10.1504/IJLSM.2011.041864</a>
A new model to mitigating random disruption risks of facility and transportation in supply chain network design	<a href="https://doi.org/10.1007/s00170-013-5404-0">https://doi.org/10.1007/s00170-013-5404-0</a>

Título	Digital Object Identifier (DOI)
A new multi-criteria scenario-based solution approach for stochastic supply chain network design	<a href="https://doi.org/10.1007/s10479-013-1435-z">https://doi.org/10.1007/s10479-013-1435-z</a>
A new robust optimization approach for integrated multi-echelon, multi-product, multi-period supply chain network design under process uncertainty	<a href="https://doi.org/10.1007/s00170-015-6796-9">https://doi.org/10.1007/s00170-015-6796-9</a>
A robust design for a closed-loop supply chain network under an uncertain environment	<a href="https://doi.org/10.1007/s00170-012-4369-8">https://doi.org/10.1007/s00170-012-4369-8</a>
A robust optimisation model for global distribution networks design	<a href="https://doi.org/10.1504/IJLSM.2013.053768">https://doi.org/10.1504/IJLSM.2013.053768</a>
A strategic decision support system for logistics and supply chain network design	<a href="https://doi.org/10.1007/s12046-016-0496-5">https://doi.org/10.1007/s12046-016-0496-5</a>
A supply chain network with product remanufacturing and carbon emission considerations: a two-phase design	<a href="https://doi.org/10.1007/s10845-017-1296-4">https://doi.org/10.1007/s10845-017-1296-4</a>
A Third-party Logistics Network Design Model under Fuzzy Random Environment	<a href="https://doi.org/10.1007/978-3-642-40078-0_8">https://doi.org/10.1007/978-3-642-40078-0_8</a>
Algorithms for a multi-level network optimization problem	<a href="https://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00306-3">https://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00306-3</a>
An evolutionary algorithm for supply chain network design with assembly line balancing	<a href="https://doi.org/10.1007/s00521-016-2238-3">https://doi.org/10.1007/s00521-016-2238-3</a>
An integrated model for logistics network design	<a href="https://doi.org/10.1007/s10479-006-0001-3">https://doi.org/10.1007/s10479-006-0001-3</a>
Application of a clustering based location-routing model to a real agri-food supply chain redesign	<a href="https://doi.org/10.1007/978-3-642-34300-1_31">https://doi.org/10.1007/978-3-642-34300-1_31</a>
Application of fuzzy multi-objective programming approach to supply chain distribution network design problem	<a href="https://doi.org/10.1007/11925231_39">https://doi.org/10.1007/11925231_39</a>
Application of Grey theory and multiobjective programming towards airline network design	<a href="https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00320-3">https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00320-3</a>
Biofuel supply chain network design and operations	<a href="https://doi.org/10.1007/978-3-319-30094-8_9">https://doi.org/10.1007/978-3-319-30094-8_9</a>

Título	Digital Object Identifier (DOI)
Biomass to energy supply chain network design: An overview of models, solution approaches and applications	<a href="https://doi.org/10.1007/978-3-319-20092-7_1">https://doi.org/10.1007/978-3-319-20092-7_1</a>
Capacities-based supply chain network design considering demand uncertainty using two-stage stochastic programming	<a href="https://doi.org/10.1007/s00170-013-5054-2">https://doi.org/10.1007/s00170-013-5054-2</a>
Chosen aspects of logistics network design method for production service companies	<a href="https://doi.org/10.1504/IJLSM.2013.053768">https://doi.org/10.1504/IJLSM.2013.053768</a>
City Logistics Network Design and Optimization Under the Environment of Electronic Commerce	<a href="https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7010-6_144">https://doi.org/10.1007/978-1-4614-7010-6_144</a>
Combinatorial Optimization in Transportation and Logistics Networks	<a href="https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7997-1_63">https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7997-1_63</a>
Constructive heuristics to the multi-period fixed charge transportation problem	<a href="https://doi.org/10.1504/IJBPSM.2010.036163">https://doi.org/10.1504/IJBPSM.2010.036163</a>
Cost optimisation of supply chain networks using Ant Colony Optimisation	<a href="https://doi.org/10.1504/IJLSM.2011.041507">https://doi.org/10.1504/IJLSM.2011.041507</a>
Cost optimisation of supply chain networks using particle swarm optimisation	<a href="https://doi.org/10.1504/IJBPSM.2010.036164">https://doi.org/10.1504/IJBPSM.2010.036164</a>
Decision models for sustainable supply chain design and management	<a href="https://doi.org/10.1007/s10479-017-2428-0">https://doi.org/10.1007/s10479-017-2428-0</a>
Design of global supply chain network with operational risks	<a href="https://doi.org/10.1007/s00170-011-3615-9">https://doi.org/10.1007/s00170-011-3615-9</a>
Design of reverse and forward supply chain network: a case study	<a href="https://doi.org/10.1504/IJLSM.2008.017601">https://doi.org/10.1504/IJLSM.2008.017601</a>
Design of synchronised supply chain: a genetic algorithm based six sigma constrained approach	<a href="https://doi.org/10.1504/IJLSM.2006.009555">https://doi.org/10.1504/IJLSM.2006.009555</a>
Designing a closed-loop supply chain with stochastic product returns: a Genetic Algorithm approach	<a href="https://doi.org/10.1504/IJLSM.2011.041863">https://doi.org/10.1504/IJLSM.2011.041863</a>
Designing an integrated logistics network in a supply chain system	<a href="https://doi.org/10.1007/s12205-013-0087-5">https://doi.org/10.1007/s12205-013-0087-5</a>
Designing an integrated multi-echelon supply chain network with competition	<a href="https://doi.org/10.1504/IJLSM.2017.082616">https://doi.org/10.1504/IJLSM.2017.082616</a>
Designing new supply chain networks: tomato and mango case studies	<a href="https://doi.org/10.1007/978-94-017-8578-5_14">https://doi.org/10.1007/978-94-017-8578-5_14</a>

Título	Digital Object Identifier (DOI)
Designing reverse logistics network for product recovery	<a href="https://doi.org/10.1504/IJBPSM.2009.033745">https://doi.org/10.1504/IJBPSM.2009.033745</a>
Development and optimisation of a new linear programming model for production/distribution network of an edible vegetable oils manufacturer	<a href="https://doi.org/10.1504/IJLSM.2011.040057">https://doi.org/10.1504/IJLSM.2011.040057</a>
Development of decision framework for warehouse decisions in supply chain network	<a href="https://doi.org/10.1504/IJLSM.2008.016571">https://doi.org/10.1504/IJLSM.2008.016571</a>
Distribution network design: A literature review and a research agenda	<a href="https://doi.org/10.1108/IJPDLM-02-2014-0035">https://doi.org/10.1108/IJPDLM-02-2014-0035</a>
Elements of manufacturing, distribution and logistics	<a href="https://doi.org/10.1007/978-3-319-26862-0">https://doi.org/10.1007/978-3-319-26862-0</a>
European Aspects of the Distribution Network Design. Problems and Models	<a href="https://doi.org/10.1007/978-3-642-78910-6_74">https://doi.org/10.1007/978-3-642-78910-6_74</a>
Food supply chain security: Issues and implications	<a href="https://doi.org/10.1007/978-0-387-79934-6_18">https://doi.org/10.1007/978-0-387-79934-6_18</a>
Fresh Produce Dual-Channel Supply Chain Logistics Network Planning Optimization	<a href="https://doi.org/10.1007/978-981-10-1837-4_93">https://doi.org/10.1007/978-981-10-1837-4_93</a>
Fuzzy multi-objective optimization for closed loop logistics network design in bread-producing industries	<a href="https://doi.org/10.1007/s00170-013-5264-7">https://doi.org/10.1007/s00170-013-5264-7</a>
Glowworm swarm optimisation algorithm for nonlinear fixed charge transportation problem in a single stage supply chain network	<a href="https://doi.org/10.1504/IJLEG.2014.064285">https://doi.org/10.1504/IJLEG.2014.064285</a>
Green supply chain design: A mathematical modeling approach based on a multi-objective optimization model	<a href="https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.08.028">https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.08.028</a>
Green supply chain network design with stochastic demand and carbon price	<a href="https://doi.org/10.1007/s10479-015-1936-z">https://doi.org/10.1007/s10479-015-1936-z</a>
Hierarchical parcel distribution facility ground network design problem	<a href="https://doi.org/10.1504/IJLEG.2010.036303">https://doi.org/10.1504/IJLEG.2010.036303</a>
Iterative improvement methods for a multiperiod network design problem	<a href="https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00217-8">https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00217-8</a>
Logistical Network Design With Robustness and Complexity Considerations	<a href="https://doi.org/10.1108/09600030710742425">https://doi.org/10.1108/09600030710742425</a>

Título	Digital Object Identifier (DOI)
Logistics and supply chain management: developments and trends	<a href="https://doi.org/10.1007/978-3-319-22288-2_1">https://doi.org/10.1007/978-3-319-22288-2_1</a>
Logistics Network Design: A Simulation Study of a Nursery Stock Channel	<a href="https://doi.org/10.1108/eb014408">https://doi.org/10.1108/eb014408</a>
Logistics network models	<a href="https://doi.org/10.1007/978-1-84800-181-7_3">https://doi.org/10.1007/978-1-84800-181-7_3</a>
Mapping structural relationships among the critical factors of rural supply chains	<a href="https://doi.org/10.1504/IJLSM.2013.057505">https://doi.org/10.1504/IJLSM.2013.057505</a>
Minimisation of the total operating cost by using supply chain optimisation model (COSCOM)	<a href="https://doi.org/10.1504/IJLEG.2012.047215">https://doi.org/10.1504/IJLEG.2012.047215</a>
Modeling supply chain network design problem with joint service level constraint	<a href="https://doi.org/10.1007/978-3-642-25661-5_41">https://doi.org/10.1007/978-3-642-25661-5_41</a>
Modelling and analysis of network design for a closed-loop supply chain	<a href="https://doi.org/10.1504/IJLSM.2013.052064">https://doi.org/10.1504/IJLSM.2013.052064</a>
Models for reliable supply chain network design	<a href="https://doi.org/10.1007/978-3-540-68056-7_13">https://doi.org/10.1007/978-3-540-68056-7_13</a>
Multi objective outbound logistics network design for a manufacturing supply chain	<a href="https://doi.org/10.1007/s10845-012-0635-8">https://doi.org/10.1007/s10845-012-0635-8</a>
Multi-commodity Logistics Network Design Based on Heuristic Algorithm	<a href="https://doi.org/10.1007/978-3-642-27287-5_13">https://doi.org/10.1007/978-3-642-27287-5_13</a>
Multi-echelon closed-loop supply chain network design and configuration under supply risks and logistics risks	<a href="https://doi.org/10.1504/IJLSM.2017.085882">https://doi.org/10.1504/IJLSM.2017.085882</a>
Multi-objective Based Fuzzy Mathematical Programming Model for Green Logistics Network Design Under Uncertainty	<a href="https://doi.org/10.1007/978-3-662-43871-8_202">https://doi.org/10.1007/978-3-662-43871-8_202</a>
Multi-objective dual-sale channel supply chain network design based on NSGA-II	<a href="https://doi.org/10.1007/978-3-319-07455-9_50">https://doi.org/10.1007/978-3-319-07455-9_50</a>
Network design: Optimizing the global production footprint	<a href="https://doi.org/10.1007/978-3-540-71653-2_4">https://doi.org/10.1007/978-3-540-71653-2_4</a>
On assessing the sensitivity to uncertainty in distribution network design	<a href="https://doi.org/10.1108/09600030610642904">https://doi.org/10.1108/09600030610642904</a>
Optimal design of supply chain network under uncertainty environment using	<a href="https://doi.org/10.1007/s40092-017-0201-2">https://doi.org/10.1007/s40092-017-0201-2</a>

Título	Digital Object Identifier (DOI)
hybrid analytical and simulation modeling approach	
Optimisation of policy parameters in supply chain applications	<a href="https://doi.org/10.1080/13675560500092184">https://doi.org/10.1080/13675560500092184</a>
Optimisation of supply chain logistics network using random search techniques	<a href="https://doi.org/10.1504/IJLSM.2007.011824">https://doi.org/10.1504/IJLSM.2007.011824</a>
Optimization of green agri-food supply chain network using particle swarm optimization algorithm	<a href="https://doi.org/10.1007/978-3-319-01766-2_11">https://doi.org/10.1007/978-3-319-01766-2_11</a>
Optimization of the Supply Chain Management of Sugarcane in Cuba	<a href="https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2483-7_5">https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2483-7_5</a>
Optimum Network Design Models and Algorithms in Transportation and Communication	<a href="https://doi.org/10.1080/1367556031000063022">https://doi.org/10.1080/1367556031000063022</a>
Particle Swarm Optimisation for fixed-charge transportation problem in a Multistage Supply Chain Network	<a href="https://doi.org/10.1504/IJLSM.2011.041692">https://doi.org/10.1504/IJLSM.2011.041692</a>
Petroleum supply chain network design and tactical planning with demand uncertainty	<a href="https://doi.org/10.1007/978-3-319-24154-8_8">https://doi.org/10.1007/978-3-319-24154-8_8</a>
Profit-based reconfiguration of express courier service network with multiple consolidation terminals	<a href="https://doi.org/10.1504/IJLSM.2010.032947">https://doi.org/10.1504/IJLSM.2010.032947</a>
Quantitative models for reverse logistics: A review	<a href="https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00230-0">https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00230-0</a>
Re-engineering the inter-facility process of a parcel distribution company to improve the level of performance	<a href="https://doi.org/10.1080/13675567.2011.553495">https://doi.org/10.1080/13675567.2011.553495</a>
Recent Issues in International Supply Chain Network Design—Economic Partnership Modeling	<a href="https://doi.org/10.1007/978-4-431-55420-2_8">https://doi.org/10.1007/978-4-431-55420-2_8</a>
Reliable forward-reverse logistics network design under partial and complete facility disruptions	<a href="https://doi.org/10.1504/IJLSM.2015.068426">https://doi.org/10.1504/IJLSM.2015.068426</a>
Remanufacturing logistics network design considering FTZ	<a href="https://doi.org/10.1007/978-3-662-43871-8_204">https://doi.org/10.1007/978-3-662-43871-8_204</a>
Reverse Logistics: Network Design Based on Life Cycle Assessment	<a href="https://doi.org/10.1007/978-3-642-41266-0_54">https://doi.org/10.1007/978-3-642-41266-0_54</a>
Robust optimization of supply chain network design in fuzzy decision system	<a href="https://doi.org/10.1007/s10845-014-0939-y">https://doi.org/10.1007/s10845-014-0939-y</a>

Título	Digital Object Identifier (DOI)
Service network design models for two-tier city logistics	<a href="https://doi.org/10.1007/s11590-013-0662-1">https://doi.org/10.1007/s11590-013-0662-1</a>
Supply chain management using multiagent systems in the agri-food industry	<a href="https://doi.org/10.1007/978-3-319-04735-5_10">https://doi.org/10.1007/978-3-319-04735-5_10</a>
Supply Chain Network Design	<a href="https://doi.org/10.1007/978-0-387-71909-2_8">https://doi.org/10.1007/978-0-387-71909-2_8</a>
Supply chain network design and transshipment hub location for third party logistics providers	<a href="https://doi.org/10.1007/11751595_97">https://doi.org/10.1007/11751595_97</a>
Supply network design	<a href="https://doi.org/10.1007/978-3-7908-2156-7_6">https://doi.org/10.1007/978-3-7908-2156-7_6</a>
Survey research design in supply chain management: the need for evolution in our expectations	<a href="https://doi.org/10.1111/jscm.12161">https://doi.org/10.1111/jscm.12161</a>
Sustainable supply network management	<a href="https://doi.org/10.1016/S1066-7938(01)00122-1">https://doi.org/10.1016/S1066-7938(01)00122-1</a>
Systematic framework for design of environmentally sustainable pharmaceutical supply chain network	<a href="https://doi.org/10.1007/s12247-016-9255-8">https://doi.org/10.1007/s12247-016-9255-8</a>
The design of a responsive sustainable supply chain network under uncertainty	<a href="https://doi.org/10.1007/s00170-015-6967-8">https://doi.org/10.1007/s00170-015-6967-8</a>
The design of production-distribution networks: A mathematical programming approach	<a href="https://doi.org/10.1007/0-387-26281-4_9">https://doi.org/10.1007/0-387-26281-4_9</a>
The network of logistics decisions	<a href="https://doi.org/10.1007/0-387-24977-X_1">https://doi.org/10.1007/0-387-24977-X_1</a>
The Reduction of CO2 Emission into the Supply Network Design: A Review of Current Trends in Mathematical Models	<a href="https://doi.org/10.1007/978-1-4471-5349-8_16">https://doi.org/10.1007/978-1-4471-5349-8_16</a>
Towards knowledge logistics in agile sme networks	<a href="https://doi.org/10.1007/0-387-23581-7_2">https://doi.org/10.1007/0-387-23581-7_2</a>
Using cross-docking operations in a reverse logistics network design: a new approach	<a href="https://doi.org/10.1007/s11740-015-0646-3">https://doi.org/10.1007/s11740-015-0646-3</a>

## Modelos de Distribución

En una cadena de suministro, el flujo de mercancías entre un proveedor y el cliente pasa por varias etapas, y cada etapa puede constar de muchas instalaciones. En los últimos años, el problema de diseño de *redes de cadenas de suministro* (SCN, por sus siglas en inglés) ha ganado gran relevancia debido a la creciente competitividad introducida por la globalización



del mercado. La administración de la cadena de suministro es una estrategia a través de la cual se puede lograr dicha integración.

El diseño de la red logística es uno de los problemas de decisión estratégica más completos que deben optimizarse para tener una operación eficiente a largo plazo de toda la cadena de suministro. El diseño determina el número, la ubicación, la capacidad y el tipo de plantas, almacenes y centros de distribución (DC) que se utilizarán. También establece canales de distribución y la cantidad de materiales y artículos para consumir, producir y enviar de proveedores a clientes. Los modelos de redes logísticas cubren una amplia gama de formulaciones que van desde el simple tipo de producto único hasta los complejos productos múltiples, y desde los modelos determinísticos lineales hasta los modelos complejos estocásticos no lineales. A continuación, se presenta una serie de modelos generales de logística utilizados en la distribución de mercancías.

### 1. Modelo de Logística Lineal

Los modelos de logística lineal (o problema de transporte: TP) contienen dos conjuntos principales de restricciones: un conjunto de restricciones asociadas con los nodos fuente denotados  $a_i$  y un conjunto de restricciones asociadas con los nodos de destino. Existen variables en el problema, cada una correspondiente a un arco desde un nodo de origen a un nodo de destino (ver Figura 1).

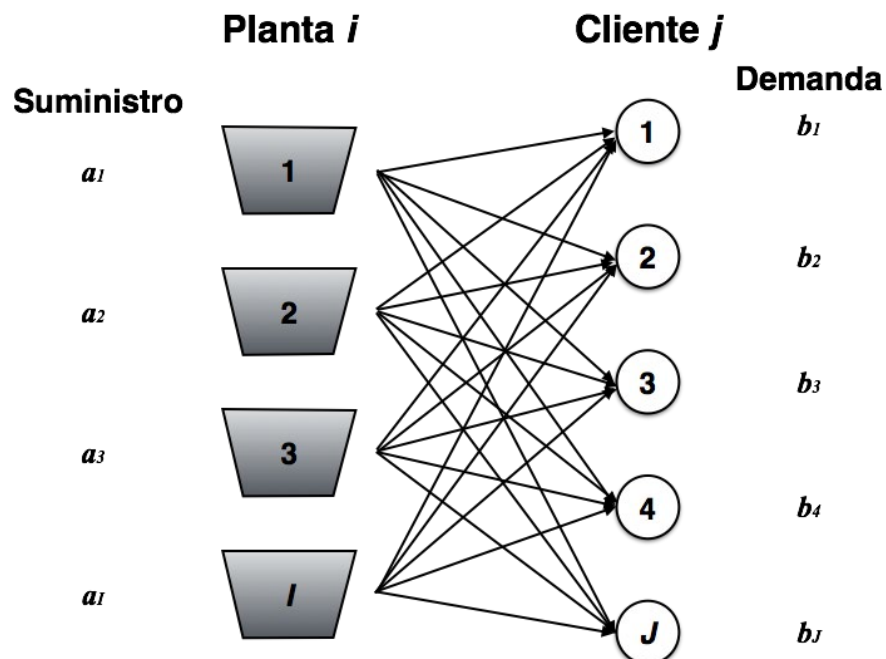


Figura 1. Modelo de Logística Lineal.

El objetivo del modelo de transporte es encontrar el patrón de envío al costo mínimo. La notación utilizada en este problema es la siguiente:

### Índices

$I$ : denota el conjunto de plantas, donde  $(i = 1, 2, \dots, I)$ .

$J$ : denota el conjunto de clientes, donde  $(j = 1, 2, \dots, J)$ .

### Parámetros

$a_i$ : capacidad de la planta  $i$ .

$b_j$ : demanda del cliente  $j$ .

$c_{ij}$ : costo unitario de transportar desde la planta  $i$  hasta el cliente  $j$ .

### Variables

$x_{ij}$  = cantidad de envío desde la planta  $i$  hasta el cliente  $j$ .

### Formulación Matemática

$$\text{Minimizar } z = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_{ij} x_{ij} \quad (1)$$

$$\text{Sujeto a: } \sum_{j \in J} x_{ij} \leq a_i \quad \forall i \in I \quad (2)$$

$$\sum_{i \in I} x_{ij} \geq b_j \quad \forall j \in J \quad (3)$$

$$x_{ij} \geq 0 \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (4)$$

En la función objetivo (1) se minimizan los costos de envío. Las restricciones en las Eqs. (2) se aseguran las limitantes de capacidad de las plantas. Las restricciones en Eqs. (3) aseguran que todas las demandas de los clientes sean satisfechas. Las restricciones en las Eqs. (4) imponen la restricción de no negatividad en las variables de decisión. Note que tal formulación es consistente solamente si:

$$\sum_{i \in I} a_i = \sum_{j \in J} b_j \quad (5)$$

Es decir, debe de existir un equilibrio entre lo que se produce y lo que se demanda. Aunque esto parece ser muy restrictivo, puede eludirse fácilmente mediante el empleo de lo que se conoce como fuentes ficticias o sumideros ficticios.

## 2. Modelo de Logística Generalizado

Es una extensión del modelo de logística básico con la consideración de que existen cambios en las cantidades de envío. Generalmente se formula de la siguiente forma:

### Índices

$I$ : denota el conjunto de plantas, donde  $(i = 1, 2, \dots, I)$ .

$J$ : denota el conjunto de clientes, donde  $(j = 1, 2, \dots, J)$ .

### Parámetros

$a_i$ : capacidad de la planta  $i$ .

$b_j$ : demanda del cliente  $j$ .

$c_{ij}$ : costo unitario de transportar desde la planta  $i$  hasta el cliente  $j$ .

$p_{ij}$ : cantidad de mercancía que se transportará desde la planta  $i$  hasta el cliente  $j$ .

### Variables

$x_{ij}$  = cantidad de envío desde la planta  $i$  hasta el cliente  $j$ .

### Formulación Matemática

$$\text{Minimizar } z = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_{ij} x_{ij} \quad (6)$$

$$\text{Sujeto a: } \sum_{j \in J} x_{ij} \leq a_i \quad \forall i \in I \quad (7)$$

$$\sum_{i \in I} p_{ij} x_{ij} \geq b_j \quad \forall j \in J \quad (8)$$

$$x_{ij} \geq 0 \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (9)$$

El modelo logístico generalizado se utiliza ampliamente para tratar problemas en donde la cantidad de productos a enviar puede cambiar durante el transporte por diversos motivos. Por ejemplo la pérdida o la putrefacción de los alimentos.

### 3. Modelo de Logística Capacitado

Es una extensión del modelo de logística generalizado con limitaciones de capacidad de transporte en cada ruta. La notación matemática del modelo es la siguiente:

### Índices

$I$ : denota el conjunto de plantas, donde  $(i = 1, 2, \dots, I)$ .

$J$ : denota el conjunto de clientes, donde  $(j = 1, 2, \dots, J)$ .

### Parámetros

$a_i$ : capacidad de la planta  $i$ .

$b_j$ : demanda del cliente  $j$ .

$c_{ij}$ : costo unitario de transportar desde la planta  $i$  hasta el cliente  $j$ .

$p_{ij}$ : cantidad de mercancía que se transportará desde la planta  $i$  hasta el cliente  $j$ .

$u_{ij}$ : cantidad máxima que se puede transportar desde la planta  $i$  hasta el cliente  $j$ .

### Variables

$x_{ij}$  = cantidad de envío desde la planta  $i$  hasta el cliente  $j$ .

### Formulación Matemática

$$\text{Minimizar } z = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_{ij} x_{ij} \quad (10)$$

$$\text{Sujeto a: } \sum_{j \in J} x_{ij} \leq a_i \quad \forall i \in I \quad (11)$$

$$\sum_{i \in I} p_{ij} x_{ij} \geq b_j \quad \forall j \in J \quad (12)$$

$$x_{ij} \leq u_{ij} \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (13)$$

$$x_{ij} \geq 0 \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (14)$$

#### 4. Áreas de Aplicación

- Planificación de la producción.
- Diseño de rutas.
- Logística humanitaria.
- Logística inversa.
- Seguridad pública.
- Servicios de salud.
- Transporte.
- Tecnologías de información.

#### 5. Artículos de referencia

Título	Digital Object Identifier (DOI)
A bi-objective integrated procurement, production, and distribution problem of a multi-echelon supply chain network design: A new tuned MOEA	<a href="https://doi.org/10.1016/j.cor.2014.08.010">https://doi.org/10.1016/j.cor.2014.08.010</a>
A case analysis of a sustainable food supply chain distribution system—A multi-objective approach	<a href="https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2014.02.003">https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2014.02.003</a>
A cost optimisation strategy for a single warehouse multi-distributor vehicle routing system in stochastic scenario	<a href="https://doi.org/10.1504/IJLSM.2011.042056">https://doi.org/10.1504/IJLSM.2011.042056</a>
A design of distribution network and development of efficient distribution policy	<a href="https://doi.org/10.1504/IJLSM.2011.040062">https://doi.org/10.1504/IJLSM.2011.040062</a>

Título	Digital Object Identifier (DOI)
A four-echelon supply chain network design with shortage. Mathematical modelling and solution methods	<a href="https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2014.12.002">https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2014.12.002</a>
A framework for service-based supply chain	<a href="https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.11.025">https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.11.025</a>
A genetic algorithm to optimize the total cost and service level for just-in-time distribution in a supply chain	<a href="https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2006.11.028">https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2006.11.028</a>
A heuristic methodology for order distribution in a demand driven collaborative supply chain	<a href="https://doi.org/10.1080/0020754031000103293">https://doi.org/10.1080/0020754031000103293</a>
A method for a robust optimization of joint product and supply chain design	<a href="https://doi.org/10.1007/s10845-014-0908-5">https://doi.org/10.1007/s10845-014-0908-5</a>
A multi-objective 3PL allocation problem for fish distribution	<a href="https://doi.org/10.1108/09600030610710863">https://doi.org/10.1108/09600030610710863</a>
A multi-objective location-allocation problem with lateral transshipment between distribution centres	<a href="https://doi.org/10.1504/IJLSM.2015.072749">https://doi.org/10.1504/IJLSM.2015.072749</a>
A multi-objective optimisation algorithm for new distribution centre location	<a href="https://doi.org/10.1504/IJBPSM.2015.073769">https://doi.org/10.1504/IJBPSM.2015.073769</a>
A Simulation Model for a Production Distribution System	<a href="https://doi.org/10.1108/EUM00000000000315">https://doi.org/10.1108/EUM00000000000315</a>
A simulation/metaheuristic approach to newspaper production and distribution supply chain problems	<a href="https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2009.03.001">https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2009.03.001</a>
A two-phased approach to the supply network reconfiguration problem	<a href="https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00063-6">https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00063-6</a>
An integrated approach for production and distribution planning in supply chain management	<a href="https://doi.org/10.1080/00207540412331327718">https://doi.org/10.1080/00207540412331327718</a>
Application of fuzzy mathematical programming approach to the production allocation and distribution supply chain network problem	<a href="https://doi.org/10.1016/j.eswa.2009.12.062">https://doi.org/10.1016/j.eswa.2009.12.062</a>
Bi-objective optimization of a multi-product multi-period three-echelon supply chain problem under uncertain environments: NSGA-II and NREGA	<a href="https://doi.org/10.1016/j.ins.2014.08.068">https://doi.org/10.1016/j.ins.2014.08.068</a>
Collaborative production–distribution planning in supply chain: a fuzzy goal programming approach	<a href="https://doi.org/10.1016/j.tre.2006.11.001">https://doi.org/10.1016/j.tre.2006.11.001</a>

Título	Digital Object Identifier (DOI)
Cost allocation in the Chinese postman problem	<a href="https://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00310-5">https://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00310-5</a>
Customer-facing supply chain practices -The impact of demand and distribution management on supply chain success	<a href="https://doi.org/10.1016/j.jom.2012.02.001">https://doi.org/10.1016/j.jom.2012.02.001</a>
Design of an integrated supplier selection and multi-echelon distribution inventory model in a built-to-order supply chain environment	<a href="https://doi.org/10.1080/00207540500381427">https://doi.org/10.1080/00207540500381427</a>
Designing the distribution network in a supply chain	<a href="https://doi.org/10.1016/S1366-5545(02)00044-3">https://doi.org/10.1016/S1366-5545(02)00044-3</a>
Distribution Strategies that Minimize Transportation and Inventory Costs	<a href="https://doi.org/10.1287/opre.33.3.469">https://doi.org/10.1287/opre.33.3.469</a>
Fuzzy multi-objective production/distribution planning decisions with multi-product and multi-time period in a supply chain	<a href="https://doi.org/10.1016/j.cie.2008.02.008">https://doi.org/10.1016/j.cie.2008.02.008</a>
Fuzzy-genetic approach to aggregate production–distribution planning in supply chain management	<a href="https://doi.org/10.1016/j.ins.2007.04.012">https://doi.org/10.1016/j.ins.2007.04.012</a>
Genetic algorithms for a supply management problem: MIP-recombination vs greedy decoder	<a href="https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.06.060">https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.06.060</a>
Genetic algorithms for supply chain scheduling: A case study in the distribution of ready-mixed concrete	<a href="https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.12.019">https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.12.019</a>
Genetic Optimisation of a Fuzzy Distribution Model	<a href="https://doi.org/10.1108/09600030010346440">https://doi.org/10.1108/09600030010346440</a>
Heterogeneous truck routing policies with tour routing time restriction: a case study of a Malaysian trucking company	<a href="https://doi.org/10.1504/IJLSM.2014.061020">https://doi.org/10.1504/IJLSM.2014.061020</a>
Heuristic to solve bi-objective allocation problem in distribution logistics	<a href="https://doi.org/10.1504/IJLEG.2009.026413">https://doi.org/10.1504/IJLEG.2009.026413</a>
Improvement of Inter-facility Shipments Efficiency by Means of a Heuristic Bin Packing Algorithm	<a href="https://doi.org/10.1080/13675560210148650">https://doi.org/10.1080/13675560210148650</a>
Integrated production-inventory-distribution optimisation in a multi-	<a href="https://doi.org/10.1504/IJVCM.2010.033616">https://doi.org/10.1504/IJVCM.2010.033616</a>



Título	Digital Object Identifier (DOI)
echelon, multi-product, multi-carrier, multi-period system	
Integrated production/distribution planning in supply chains: An invited review	<a href="https://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)90299-5">https://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)90299-5</a>
Integrating multimodal transport into forest-delivered biofuel supply chain design	<a href="https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.02.047">https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.02.047</a>
Integration of closed loop distribution supply chain network and 3PRLP selection for the case of battery recycling	<a href="https://doi.org/10.1080/00207541003794876">https://doi.org/10.1080/00207541003794876</a>
Material flow optimisation in a multi-echelon and multi-product supply chain	<a href="https://doi.org/10.1504/IJLSM.2017.080633">https://doi.org/10.1504/IJLSM.2017.080633</a>
Mathematical model and genetic algorithm for distribution logistics problem with maximum route length	<a href="https://doi.org/10.1504/IJLEG.2008.023164">https://doi.org/10.1504/IJLEG.2008.023164</a>
Matheuristics based on iterative linear programming and slope scaling for multicommodity capacitated fixed charge network design	<a href="https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.01.022">https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.01.022</a>
Modelling supply chain decision problem with fixed charge – a review	<a href="https://doi.org/10.1504/IJBPSM.2011.042007">https://doi.org/10.1504/IJBPSM.2011.042007</a>
Models and methods for the City Logistics. The two-echelon capacitated vehicle routing problem	<a href="https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00844731">https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00844731</a>
On a class of three-dimensional transshipment problems	<a href="https://doi.org/10.1504/IJSTL.2015.069668">https://doi.org/10.1504/IJSTL.2015.069668</a>
Optimal production allocation and distribution supply chain networks	<a href="https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2007.02.035">https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2007.02.035</a>
Optimal stationary policies in a 3-stage serial production-distribution logistic chain facing constant and continuous demand	<a href="https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.02.021">https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.02.021</a>
Optimizing a bi-objective multi-product multi-period three-echelon supply chain network with warehouse reliability	<a href="https://doi.org/10.1016/j.eswa.2014.11.018">https://doi.org/10.1016/j.eswa.2014.11.018</a>
Ordering and pricing policies in a manufacturing and distribution supply chain for fashion products	<a href="https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2007.06.010">https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2007.06.010</a>

Título	Digital Object Identifier (DOI)
Production and distribution lot sizing in a two stage supply chain	<a href="https://doi.org/10.1080/07408170304401">https://doi.org/10.1080/07408170304401</a>
Production-distribution planning in supply chain using a hybrid approach	<a href="https://doi.org/10.1080/09537280110061566">https://doi.org/10.1080/09537280110061566</a>
Production–distribution planning in supply chain considering capacity constraints	<a href="https://doi.org/10.1016/S0360-8352(02)00063-3">https://doi.org/10.1016/S0360-8352(02)00063-3</a>
Reorganization of distribution in globalization of markets: the dynamic context of supply chain management	<a href="https://doi.org/10.1108/13598540310500259">https://doi.org/10.1108/13598540310500259</a>
Scheduling of truck arrivals, truck departures and shop-floor operation in a cross-dock platform, based on trucks loading plans	<a href="https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.09.008">https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.09.008</a>
Service supply chain management. A review of operational models	<a href="https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.05.053">https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.05.053</a>
Simulation model of multicompartment distribution in the catering supply chain	<a href="https://doi.org/10.1016/S0377-2217(00)00204-6">https://doi.org/10.1016/S0377-2217(00)00204-6</a>
Solution of real-world postman problems	<a href="https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.06.002">https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.06.002</a>
Solving the medium newspaper production/distribution problem	<a href="https://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00300-2">https://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00300-2</a>
Solving time minimising transshipment problem	<a href="https://doi.org/10.1504/IJSTL.2015.067848">https://doi.org/10.1504/IJSTL.2015.067848</a>
Strategic production-distribution models: A critical review with emphasis on global supply chain models	<a href="https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)80080-X">https://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)80080-X</a>
Study of Multi-Commodity Network Flow problem for the Patient Distribution System	<a href="https://doi.org/10.1504/IJLSM.2012.047059">https://doi.org/10.1504/IJLSM.2012.047059</a>
Supply chain network design: partner selection and production/distribution planning using a systematic model	<a href="https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2601949">https://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2601949</a>
Supply chain operations: Serial and distribution inventory systems	<a href="https://doi.org/10.1016/S0927-0507(03)11010-9">https://doi.org/10.1016/S0927-0507(03)11010-9</a>
Supply chain scheduling: distribution systems	<a href="https://doi.org/10.1111/j.1937-5956.2006.tb00243.x">https://doi.org/10.1111/j.1937-5956.2006.tb00243.x</a>
Sustainable supply chain models for base of the pyramid	<a href="https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.001">https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.001</a>

Título	Digital Object Identifier (DOI)
The application of linear programming to a distribution system orientated toward service	<a href="https://doi.org/10.1108/eb014279">https://doi.org/10.1108/eb014279</a>
The balanced allocation of customers to multiple distribution centers in the supply chain network: a genetic algorithm approach	<a href="https://doi.org/10.1016/S0360-8352(02)00067-0">https://doi.org/10.1016/S0360-8352(02)00067-0</a>
The changing landscape of supply chain management, marketing channels of distribution, logistics and purchasing	<a href="https://doi.org/10.1108/08858620610708911">https://doi.org/10.1108/08858620610708911</a>
The Effect of Ecological Factors on Distribution Network Evaluation	<a href="https://doi.org/10.1080/13675560124141">https://doi.org/10.1080/13675560124141</a>
The power of coordinated decisions for short-life-cycle products in a manufacturing and distribution supply chain	<a href="https://doi.org/10.1023/A:1007619423631">https://doi.org/10.1023/A:1007619423631</a>
Transports integration tools for supply chain management	<a href="https://doi.org/10.1080/13675560500534599">https://doi.org/10.1080/13675560500534599</a>
Using predetermined partial solutions for solving a heterogeneous truck fleet distribution model	<a href="https://doi.org/10.1504/IJPS.2014.066688">https://doi.org/10.1504/IJPS.2014.066688</a>
Using Simulated Annealing to Solve the p-Hub Median Problem	<a href="https://doi.org/10.1108/09600030110389532">https://doi.org/10.1108/09600030110389532</a>
Variables in the Design of Distribution Systems: In the Confectionery, Pharmaceutical, and Shirt Industries	<a href="https://doi.org/10.1108/eb014321">https://doi.org/10.1108/eb014321</a>