

MODELO HEURÍSTICO - MATEMÁTICO PARA LA LOCALIZACIÓN DE INSTALACIONES INDUSTRIALES

JUAN BENJAMÍN DUARTE DUARTE

*Profesor Asistente
Escuela de Estudios Industriales y Empresariales
Universidad Industrial de Santander
jduarte@uis.edu.co*

NÉSTOR RAÚL ORTIZ PIMIENTO

*Profesor Asistente
Escuela de Estudios Industriales y Empresariales
Universidad Industrial de Santander
nortiz@uis.edu.co*

EDWIN ALBERTO GARAVITO HERNÁNDEZ

*Profesor Asistente
Escuela de Estudios Industriales y Empresariales
Universidad Industrial de Santander
garavito@uis.edu.co*

RESUMEN

El siguiente artículo presenta una propuesta metodológica para dar solución al problema de localización de instalaciones industriales o empresariales. Este problema se presenta cuando una compañía va a expandir sus operaciones comerciales o cuando se va a crear una nueva empresa. El modelo consta de dos fases: la primera fase se basa en un método heurístico de ponderación de factores de localización (arrendamientos, leyes locales, costo de mano de obra, etc.) en donde se busca seleccionar los lugares con mayores potencialidades para ubicar las instalaciones; la segunda fase valida a través de un método matemático cada una de las localizaciones potenciales que han sido propuestas por el método heurístico a fin de determinar el lugar o los lugares óptimos de ubicación.

PALABRAS CLAVE: Localización de plantas, programación lineal, heurística, instalaciones industriales, costos de transporte, logística.

ABSTRACT

This paper presents a methodological proposal to solve the location of industrial and enterprise installation problem. This matter arises when a company is about to expand its commercial operations or when a new enterprise is to be created. The model contains two phases: the first one is based on the heuristic method of location factors ponderation (rent, local laws, labour force, etc) which attempts to select the places with higher potentialities to locate the installations. The second phase, which is carried out by means of a mathematical method, validates every potential location which has been proposed by the heuristic method to determine the optimal location.

KEY WORDS: Locate installations, linear programming, heuristic, installations, costs of transport, logistics.

INTRODUCCIÓN

Uno de los principales problemas que deben resolverse cuando se desarrolla un plan de negocios para la expansión o para la creación de una empresa, tiene que ver con la localización física de sus instalaciones. Estas instalaciones pueden ser: una planta de manufactura, una bodega, o simplemente la selección de los sitios más adecuados para la instalación de puntos de atención al cliente y despacho de mercancías, en todos los casos se debe desarrollar un proceso sistemático, orientado a la evaluación de los elementos que influyen en esta localización o la influencia de la localización en el desempeño del negocio.

De cualquier manera, el proceso de análisis y decisión se tiene que fundamentar en la relación costo beneficio, teniendo cuidado de no limitar los análisis a las relaciones netamente económicas (aunque se puede demostrar que todo finalmente afecta el desempeño económico de la empresa), e incluir factores que normalmente son de tipo cualitativo en los que se evalúan elementos del entorno como impacto social, ambiental entre otros.

La metodología presentada en este artículo es una combinación de un modelo heurístico¹ con uno matemático. El modelo heurístico sirve como filtro para depurar los lugares potenciales en los cuales una organización desearía localizar sus instalaciones (en este caso, puntos de despacho de mercancía), y el modelo matemático determina los sitios definitivos de ubicación de las instalaciones mediante la cuantificación de los costos incurridos en el proceso de distribución de mercancías desde los diferentes puntos de despacho potenciales a los clientes ubicados en otros destinos geográficos. Al hablar de costos de transporte de mercancías se hace referencia entre otros a los costos de mano de obra, combustible, mantenimiento, terminales, carreteras, administración, etc [1].

MODELO HEURÍSTICO

La metodología recomienda que previamente se haya realizado un ejercicio de planeación estratégica, de tal forma que existan unos parámetros claros que orienten el análisis y evaluación de los factores de localización.

¹ La heurística se define como "Procedimientos simples, a menudo basados en el sentido común que se suponen ofrecerán una buena solución (aunque no necesariamente la óptima) a problemas difíciles, de modo fácil y rápido" Zanakís y Evans.

El Modelo Heurístico sigue las siguientes etapas:

1. Se debe integrar un equipo de trabajo conocedor de su situación interna y externa de la empresa, al cual se le podría dar el nombre de "Equipo Evaluador (EE) del Proyecto de Localización de la(s) Instalaciones(s)"
2. Este grupo de personas define cuales factores (mercado, materia prima, mano de obra, energía, impuestos etc.) de localización son los más relevantes para ser tenidos en cuenta en la evaluación. Un buen número de factores puede oscilar entre 5 y 8, no queriendo decir con esta cifra, que ella sea una camisa de fuerza, pues en un momento dado, el comité evaluador podría optar por más factores, si lo considera pertinente.

Por otra parte, a la hora de definir los factores, estos tienen que ser representativos de la actividad del negocio y los propósitos de evaluación; esto significa que se deben tener en cuenta solo aquellos factores que sean diferenciadores entre las posibilidades o alternativas a evaluar. Un factor que no sea diferenciador implica esfuerzos en la recopilación de información y evaluación del mismo factor, y finalmente no le aporta nada a la solución del problema, pues todas las alternativas quedarían en igualdad de condiciones al ser sometidas a evaluación por parte de este factor.

3. El equipo de trabajo pondera de 0 a 100 cada uno de los factores elegidos de acuerdo a su importancia, teniendo en cuenta que la suma de las ponderaciones de todos los factores debe totalizar el 100%.
4. El equipo determina los grados (1,2,3,...) de cada uno de los factores. Los grados describen la intensidad progresiva del factor, siendo el mayor, el de mejor cumplimiento del factor.
5. Una vez definidos los factores con sus respectivos grados, los evaluadores proceden a calificar cada una de las ciudades potenciales. Esta etapa se puede llevar a cabo principalmente de dos formas: Una donde cada evaluador califica por separado y posteriormente se halla una evaluación ya sea por consenso o en el peor de los casos por mayoría de votos o promedio aritmético; otra forma puede ser el tomar ciudad por ciudad y mediante discusión de los evaluadores, se califica factor por factor. Con el fin de facilitar esta actividad es recomendable entregar a cada evaluador una tabla como la que aparece a continuación.

Tabla 1. Matriz de evaluación de factores de localización Vs. Lugares de localización

Ponderación	P1	P2	...	Pm'-1	Pm'	Calificac.	Calif. 1 - 5
Factores Alternativas	Factor 1	Factor 2	...	Fm'-1	Fm'	Total	
Lugar potencial 1	C1	C2	...	Cm'-1	Cm'	P1*C1+P2*C2+ ...+Pm'*Cm'	
Lugar potencial 2							
Lugar potencial 3							
:							
Lugar potencial n'							

- Una vez se evalué cada uno de los lugares, se multiplica la ponderación (Pm') por la evaluación de cada uno de las calificaciones de grados (Cm') y se hace la respectiva sumatoria.
- La suma de cada uno de los lugares potenciales se lleva a una escala de uno a cinco mediante la ecuación:

$$Calificac\acute{o}n_{n-5} = \left(\frac{Calificac\acute{o}n_total}{Calificac\acute{o}n_maxima} \right) * 5$$

De las calificaciones de 1 - 5 (última columna), se escogen aquellas que sean mayores o iguales a tres. Los lugares potenciales escogidos pasan a la segunda parte del modelo, correspondiente a la formulación matemática.

Es necesario aclarar que para facilitar el proceso de evaluación a través de los factores, cada uno de ellos debe definirse en términos de las variables que deben medirse para emitir el juicio del factor, adicionalmente es necesario definir claramente el criterio de evaluación, el cual dependerá de los propósitos e intereses del negocio, esto debido a que las mismas variables pueden tener significados diferentes para diferentes tipos de negocios; es decir, mientras que para algunos negocios puede ser positivo el que exista tasas de inseguridad altas (compañías de vigilancia por ejemplo), para otro tipo de negocio esto resultaría inconveniente.

MODELO MATEMÁTICO

Los modelos matemáticos aportan al proceso elementos de juicio frente a las variables cuantitativas. Es común que se orienten estos modelos al análisis de los costos y las variables involucradas en ellos.

Estos modelos pueden incluirse dentro del mismo modelo heurístico, o lo que es más común, pueden ser usados para definir entre las alternativas seleccionadas como factibles en el modelo heurístico, es decir, tomar la decisión final luego de haber depurado las alternativas a través del análisis y evaluación de otros factores.

A continuación se hace la presentación del modelo matemático genérico y posteriormente se presenta un caso particular de la metodología, cuyo objetivo es indicar que cantidades de producto se deben despachar desde cada una de las plantas que se desea localizar en alguno(s) de los sitios potenciales, con el fin de satisfacer las demandas de los clientes de la empresa, al mínimo costo de transporte.

Variables de Decisión

A continuación se presentan las dos variables del modelo: Y_{ki} que es una variable binaria y X_{ij} que es una variable entera

$$Y_{ki} = \begin{cases} 1, & \text{si la planta } k \text{ es ubicada en el lugar } i \\ 0, & \text{en el caso contrario} \end{cases}$$

$$k=1,2,3,...r \text{ instalaciones a localizar } \quad i=1,2,3,...n$$

X_{ij} , Número de unidades de producto a despachar de la planta localizada en el lugar potencial i al cliente j .

$$i=1,2,3,...n \text{ lugares potenciales; } \quad j=1,2,3,...m \text{ clientes}$$

Función objetivo

$$\text{Minimizar el costo } Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (C_{ij} * X_{ij}) \quad [1]$$

Donde C_{ij} es el costo de transportar una unidad de producto desde la planta potencial i hasta el cliente j .

RESTRICCIONES

a) Balance de la demanda Vs la capacidad de producción

$$\sum_{j=1}^m X_{ij} \leq \sum_{k=1}^r a_k * Y_{ki} \quad \text{Para todo } i=1,2,3,...n \quad [2]$$

$$\sum_{i=1}^n X_{ij} = b_j \quad \text{Para todo } j = 1,2,3,\dots,m \quad [3]$$

$$k = 1,2,3,\dots,r ; \quad j = 1,2,3,\dots,m$$

Donde a_k es la capacidad de producción de la planta a localizar k . Lo que quiere decir que hay tantas restricciones de capacidad, como plantas se desee localizar.

b) De demanda

$$i = 1,2,3,\dots,n$$

Donde b_j es la demanda de cada uno de los clientes. Lo que quiere decir que hay tantas restricciones de demanda como clientes hayan.

c) De apertura de plantas

$$\sum_{i=1}^n y_{ki} \leq 1 \quad \text{Para todo } k = 1,2,3,\dots,r \quad [4]$$

Esta restricción lo que busca es forzar al modelo, a que una planta se pueda abrir, a lo sumo, en un lugar potencial.

d) Obvias

$$X_{ij} \geq 0 \text{ Variables enteras} \quad [5]$$

En la Figura 1. se puede apreciar un ejemplo del modelo matemático genérico con las respectivas variables.

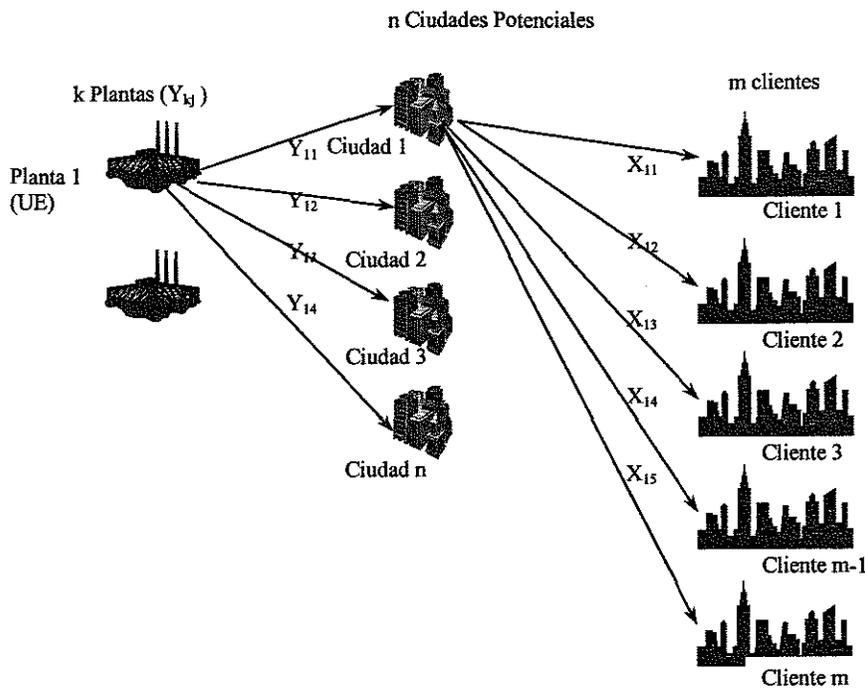


Figura 1. Gráfica genérica del modelo matemático

A continuación se presenta el caso de estudio en donde se aplica el modelo en su totalidad.

Caso Estudio para la Empresa Wonder

Una Empresa de electrodomésticos menores, desea localizar en Latinoamérica dos plantas industriales que en el momento están localizadas en África las cuales tienen capacidades de producción de 120.000 UE² al mes y 150.000 UE al mes. Para

ello el grupo evaluador de la estrategia, desea usar inicialmente la metodología de evaluación de factores y posteriormente con los lugares potenciales resultantes, configurar un modelo matemático que minimice el costo de transporte hacia los clientes del producto terminado.

Los Factores elegidos son:

Factor 1. MATERIA PRIMA: Las principales materias primas por pesaje son: 25% plástico, 40% metal, 30 eléctrico y electrónico y 5% materiales generales.

² Unidades Equivalentes de producto

Grado Descripción

- 1 En el sitio se cuenta con solamente materiales generales.
- 2 En el sitio se cuenta con materiales generales y materia prima para plástico.
- 3 En el sitio se cuenta con materiales generales, plástico y troquelado de metal.
- 4 En el sitio se cuenta con materiales generales, plástico, troquelado, subensambles.

Factor 2. IMPUESTOS: Se tienen en cuenta el porcentaje de utilidades destinadas para pagar impuestos.

Grado Descripción

- 1 Se graba en un 35% y 40% las utilidades
- 2 Se graba en un 30% y 35% las utilidades
- 3 Se graba en un 25% y 30% las utilidades
- 4 Se graba en un 15% y 25% las utilidades

Factor 3. TALENTO HUMANO: Calidad de la preparación del personal en el sitio.

Grado Descripción

- 1 Se requiere llevar personal al sitio de localización.
- 2 Se dispone de personal pero requiere capacitación fuera de la empresa
- 3 Se dispone de personal pero requiere capacitación que puede desarrollarse en la misma empresa.
- 4 Se dispone de personal capacitado para el proceso

Factor 4. ELECTRICIDAD Y ENERGÍA: Se tiene en cuenta el costo de la energía requerida para el proceso.

Grado Descripción

- 1 El costo de energía está en el rango de 150-200 \$/Kw-hr
- 2 El costo de energía está en el rango de 120-150 \$/Kw-hr
- 3 El costo de energía está en el rango de 100-120 \$/Kw-hr
- 4 El costo de energía es inferior a 100 \$/Kw-hr

Una vez evaluado los cuatro factores en las ciudades potenciales de localización: Lima, Quito, Panamá, Bogotá, México, Caracas y Brasilia se llegan a la siguiente tabla:

Tabla 2. *Valuación de factores Vs. lugares*

Ponderación	0.2	0.25	0.25	0.3		
Ciudad-Fact	Mat. Prima	Impuesto	T. Humano	Energía	Calific. Absoluta	Calific. Relativa
Lima	1	3	1	2	1.8	2.250
Quito	2	2	2	1	1.7	2.125
Panamá*	2	4	3	2	2.75	3.437
Bogotá*	3	3	3	2	2.7	3.375
México*	4	2	3	4	3.25	4.062
Caracas	3	1	1	2	1.7	2.125
Brasilia*	2	1	4	3	2.55	3.187

La calificación absoluta para la ciudad de lima se calcula así: $0.2*1+0.25*3+0.25*1+0.3*2=1.8$

La calificación relativa para la ciudad de lima se calcula así: $(1,8/4)*5$, donde 4 es la máxima calificación que podría llegar a obtener una ciudad y se multiplica por 5 es para llevar este cociente a la escala de 1 a 5. Igual procedimiento se sigue para las otras ciudades.

De la anterior tabla se concluye que las ciudades de Panamá, Bogotá, México y Brasilia son las 4 ciudades que por tener una evaluación superior a 3, pasan a formar parte del modelo matemático que seleccionará entre ellas, la que implique menor costo de transporte de distribución de los productos.

MODELO MATEMÁTICO

Para formular el modelo, se debe contar con la siguiente información:

- Conocer los requerimientos de los clientes: La Paz con una demanda de 20.000 UE/mes; Buenos Aires con una demanda de 60.000 UE/mes; Buenaventura con una demanda de 60.000 UE/mes; Managua con una demanda de 25.000 UE/mes y Panamá con una demanda de 100.000 UE/mes.
- Los costos de transporte en \$/UE del producto terminado desde los lugares potenciales a localizar, hasta los principales clientes

Tabla 3. *Costos de transporte entre ciudades*

Ciudad	La Paz	Buenos Aires	Buenaventura	Managua	Panamá
Panamá	110 \$/UE	150 \$/UE	70 \$/UE	80 \$/UE	0 \$/UE
Bogotá	90	100	70	110	80
México	130	140	90	80	70
Brasilia	80	90	90	130	110

La anterior tabla contiene el costo de llevar una unidad de producto, del sitio potencial de localización hasta cada uno de los clientes.

- Otro parámetro que se debe conocer es la capacidad de las instalaciones a localizar, que para el caso de estudio son de 120.000 UE/mes para la planta 1 y 150.000 UE/mes para la planta 2.

VARIABLES DE DECISIÓN

Las dos variables que estructuran el modelo son Y_{ki} que es binaria y X_{ij} que es entera.

$$Y_{ki} = \begin{cases} 1, & \text{si la planta } k \text{ es ubicada en el lugar } i \\ 0, & \text{en el caso contrario} \end{cases}$$

$k=1,2$, (número de plantas).
 $i=1,2,3,4$ (ciudades potenciales de localización).

X_{ij} , Número de unidades de producto a despachar de la planta localizada en el lugar i al cliente j .

$i=1,2,3,4$ (Panamá, Bogotá, México, Brasilia)
 $j=1,2,3,4,5$ (La paz, Buenos Aires, Buenaventura, Managua, Panamá)

FUNCIÓN OBJETIVO

MINIMIZAR

$$\text{EL COSTO} = 110 \cdot X_{11} + 150 \cdot X_{12} + 70 \cdot X_{13} + 90 \cdot X_{14} + 0 \cdot X_{15} + 90 \cdot X_{21} + 100 \cdot X_{22} + 70 \cdot X_{23} + 110 \cdot X_{24} + 80 \cdot X_{25} + 130 \cdot X_{31} + 140 \cdot X_{32} + 90 \cdot X_{33} + 80 \cdot X_{34} + 70 \cdot X_{35} + 80 \cdot X_{41} + 90 \cdot X_{42} + 90 \cdot X_{43} + 130 \cdot X_{44} + 110 \cdot X_{45}$$

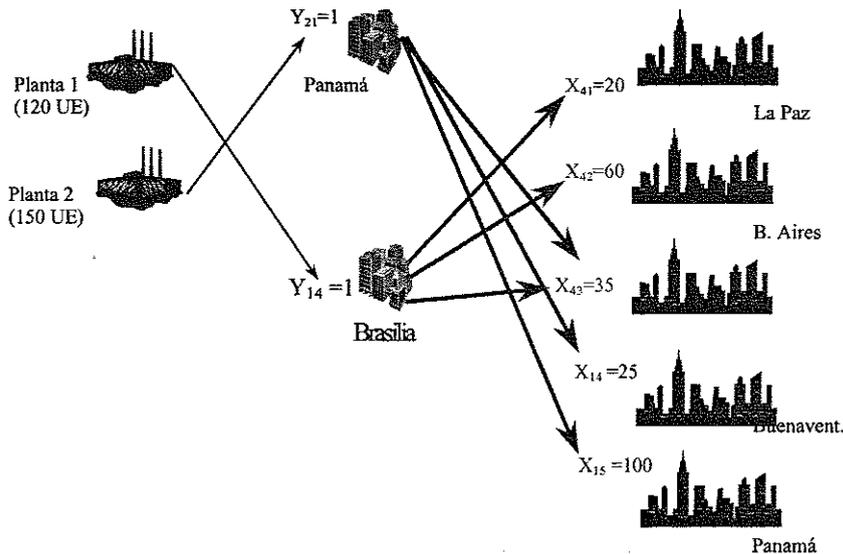


Figura. Gráfica del modelo matemático del caso de estudio (resuelto)

RESTRICCIONES

a. Por Demanda de los centros de consumo

$$\begin{aligned} X_{11} + X_{21} + X_{31} + X_{41} &= 20.000 \text{ UE de la demanda de La Paz.} \\ X_{12} + X_{22} + X_{32} + X_{42} &= 60.000 \text{ UE de la demanda de Buenos Aires.} \\ X_{13} + X_{23} + X_{33} + X_{43} &= 60.000 \text{ UE de la demanda de Buenaventura.} \\ X_{14} + X_{24} + X_{34} + X_{44} &= 25.000 \text{ UE de la demanda de Managua.} \\ X_{15} + X_{25} + X_{35} + X_{45} &= 100.000 \text{ UE de la demanda de Panamá.} \end{aligned}$$

Estas restricciones permiten que se envíe desde las diferentes ciudades potenciales, las cantidades de producto que los clientes requieren, asegurando así el abastecimiento a los clientes.

b. Balance de la capacidad de producción Vs La demanda a atender

$$\begin{aligned} \text{Planta de Panamá} & 120.000Y_{11} + 150.000Y_{21} = X_{11} + X_{12} + X_{13} + X_{14} + X_{15} \\ \text{Planta de Bogotá} & 120.000Y_{12} + 150.000Y_{22} = X_{21} + X_{22} + X_{23} + X_{24} + X_{25} \\ \text{Planta de México} & 120.000Y_{13} + 150.000Y_{23} = X_{31} + X_{32} + X_{33} + X_{34} + X_{35} \\ \text{Planta de Brasilia} & 120.000Y_{14} + 150.000Y_{24} = X_{41} + X_{42} + X_{43} + X_{44} + X_{45} \end{aligned}$$

Este conjunto de restricciones asegura que una planta al ubicarla en un lugar potencial, pueda abastecer los requerimientos de los clientes, sin sobrepasar la capacidad de las plantas.

c. Por ubicación de las plantas

$$\begin{aligned} \text{Planta 1} & Y_{11} + Y_{12} + Y_{13} + Y_{14} + Y_{15} = 1 \\ \text{Planta 2} & Y_{21} + Y_{22} + Y_{23} + Y_{24} + Y_{25} = 1 \end{aligned}$$

Estas restricciones obligan a que una planta se localice en no más de una ciudad.

d. Obvias $X_{ij} > 0$ (entera)

Una vez configurado el modelo se procede a resolverlo mediante una herramienta informática como el QSB o OPL estudio, la cual arroja los siguientes resultados:

- Las variables binarias Y14 y Y21 presentan un valor de 1 y las demás de cero, lo que significa que la planta 1, con una capacidad de 120.000 UE/mes, se debe localizar en la ciudad 4 que es Brasilia, en tanto que la planta 2, con una capacidad de 150.000 UE/mes, se debe ubicar en la ciudad 1 que en nuestro caso es Panamá.
- En cuanto a las variables enteras su resultado es: $X_{13} = 25.000$; $X_{14} = 25.000$; $X_{15} = 100.000$; $X_{41} = 20.000$; $X_{42} = 60.000$; $X_{43} = 35.000$ y las demás 0. Queriendo decir que del lugar potencial 1 que es Panamá, donde queda ubicada la planta 2, se debe despachar mensualmente a los clientes de Buenaventura (60.000 UE), Managua (25.000 UE) y Panamá (100.000 UE) y por otro lado, del lugar potencial 4 que es Brasilia, donde queda ubicada la planta 1, se debe despachar productos a los clientes de la Paz (20.000 UE) y Buenos Aires (60.000 UE). La representación gráfica³ quedaría como aparece en la pagina anterior:

CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES

- Es conveniente aclarar que el mismo modelo puede ser usado para decidir la ubicación del sitio específico de una instalación, dentro de un área metropolitana o ciudad, solo se deberán replantear los factores y algunas adaptaciones que resultan lógicas al llevar el problema a nivel local.
- Por otra parte los costos que constituyen el parámetro fundamental del modelo matemático pueden ser estimados y en su momento, negociados con las empresas transportadoras, e implícitamente en ellos están inmersos variables como la rapidez de entrega y riesgo debido al orden publico del país.
- El modelo matemático se puede llegar a ampliar con el fin de incluir a los proveedores, dado que el transporte de entrega de materias primas puede llegar a ser de gran importancia en un determinado momento.

AUTORES

Juan Benjamín Duarte Duarte, candidato a Maestría en Ingeniería Industrial de Univalle, Especialista en Ingeniería de Sistemas Univalle, Especialista en Gerencia de la Producción UIS, Ingeniero Industrial UIS. Docente tiempo completo UIS 2001a la fecha, Docente tiempo completo Univalle 1996-2001.

Néstor Raúl Ortiz Pimiento. Especialista en Gestión Tecnológica UIS. Ingeniero Industrial UIS. Docente tiempo completo UIS.

Edwin Alberto Garavito Hernández. Especialista en Gerencia de la Producción UIS, Ingeniero Industrial UIS, Docente de tiempo completo UIS 1997-a la fecha

BIBLIOGRAFÍA

- [1] BALLAO Ronald H. Logística Administración de la Cadena de Suministros. Quinta Edición, Ed. Prentice Hall. México 2004. Página 185, 186.
- [2] SULE Dileep. R.- Instalaciones de Manufactura. Thomson Learning, MÉXICO 2001
- [3] CHASE Richard B. AQUILANO, Nicholas J. - Administración de Producción y Operaciones. Mc GrawHill. 2000
- [4] TAHA A. HAMDY. Investigación de Operaciones, Sexta Edición, Ed. Prentice Hall
- [5] RICHARD MUTHER, Distribución en Planta, Ed. Hispano Europea
- [6] ZANAKIS S. Y Evans J. "Heuristic Optimization: Why, When, and How to Use it". Interfaces. Vol. 11, núm. 5 (oct. 1981), p.84.

³ Las cantidades están expresadas en miles