



ESTRATEGIA DE LOCALIZACIÓN CON ENFOQUE MULTI OBJETIVO PARA ALMACENES INTERMEDIOS EN PROCESOS DE RECICLAJE DE ENVASES DE VIDRIO

Resumen / Abstract

Los problemas de ubicación de instalaciones (*facilities location*) son considerados por diversos autores, como problemas complejos o también llamados NP-hard, y han sido ampliamente estudiados en literaturas especializadas de Investigación de Operaciones. La localización de instalaciones valora un conjunto de lugares factibles en los cuales pudieran situarse centros de producción de bienes, servicios, almacenes, etc. La ubicación de estas instalaciones implica costo de inversión en estructuras y otros costos asociados a la apertura de la misma, así como, una posible ganancia futura. A diferencia de otras investigaciones, el presente trabajo propone la obtención óptima de ubicación, con enfoque multiobjetivo, para varios almacenes simultáneamente, los cuales son declarados como intermedios en procesos de reciclaje de envases de vidrios para una cervecería cubana. El trabajo propone la utilización de Algoritmos Evolutivos Multiobjetivo, los cuales han sido abordados en investigaciones relacionadas con el tema pero orientados esencialmente a instalaciones de servicio.

The facilities location problems are considered by many authors, as complex or also called NP-hard problem, the same ones; these have been broadly studied in specialized literatures of Operations Research. The facilities location involves a group of feasible places in which could be located centers of production, services, warehouses, etc. The location of these facilities implies investment cost in structures and other costs associated to the opening this location, as well as, a possible future revenues. In contrast to other research, this work proposes optimization process, with multiobjective focus, for several warehouses simultaneously, which are declared as intermediate in processes of glass container recovery for a Cuban brewery. The work proposes the use of Multiobjective Evolutionary Algorithms, which have been approached in research related with the topic but related essentially to facilities service.

Yasel José Costa Salas, Ingeniero Industrial, Profesor Asistente, Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
e.mail: yaselcs@uclv.edu.cu

René Abreu Ledón, Ingeniero Industrial, Profesor Auxiliar, Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
e-mail: rabreu@uclv.edu.cu

Palabras clave / Key words

Localización de almacenes intermedios, Algoritmos Evolutivos

Intermediate warehouses location, Evolutionary Algorithms.

INTRODUCCIÓN

La adecuada Gestión de la Cadena de Suministro se está convirtiendo en uno de los elementos claves de la estrategia competitiva de las empresas. En la actualidad la competencia no es sólo entre empresas, sino entre cadenas de suministro. Las nuevas herramientas de gestión basadas en el uso de las tecnologías de la información y las comunicaciones, potencian la integración de las empresas que constituyen las diferentes cadenas de suministro, para conseguir un sistema único capaz de responder con mayor eficacia a las necesidades del mercado.

Sin lugar a duda la búsqueda incesante del perfeccionamiento en el campo de la logística inversa, ha propiciado que diversos autores desarrollen modelos y procedimientos relacionados con el diseño y gestión de las cadenas de suministro inversa; algunos han abordado esta problemática con visión algo limitada y otros con un nivel de profundidad avanzada. No obstante, eso no ha sido así en todas las empresas, algunas se han quedado atrás en la aplicación de la logística inversa mostrando un bajo desempeño para producir bienes o servicios, los cuales le han impedido retar la competencia.

El presente trabajo pretende dar solución a la problemática planteada por una de las Cervecería cubanas, la cual ha presentado interrupciones en sus producciones, debido esencialmente a la carencia de envases de vidrio (botella de malta, cerveza). La compañía requiere incentivar la recogida de dichos envases, mediante la ubicación de puntos de intercambios (almacenes intermedios), los cuales permitan el cambio de productos atractivos por envases de vidrio vacíos. El estudio de los problemas de localización de instalaciones se remonta a la primera década del siglo XX [1]. Ya en la década de los años sesenta, los problemas de localización de recursos o centros proveedores de servicios fueron ampliamente estudiados en la literatura de Investigación de Operaciones; tales como programas heurísticos para localización de depósitos y optimización de redes [2], la búsqueda de soluciones enteras para programas lineales [3], localización de fábricas [4] y otros trabajos que establecen modelos para la localización y número de fábricas [5; 6]. Investigaciones más recientes [7] han abordado el problema de localización de instalaciones mediante el uso de Algoritmos evolutivos, pero esencialmente enfocadas a instalaciones de servicio como locutorios de cabinas telefónicas.

A diferencia de los trabajos antes mencionados, éste propone encontrar la ubicación óptima de “n” almacenes intermedios o puntos de intercambios. La localización de estos almacenes intermedios se realiza considerando objetivos valorados por expertos en la materia.

Este trabajo está estructurado de la manera siguiente: Desarrollo, que consta de cuatro secciones, en la sección 1 se definen las funciones objetivos para su posterior formulación; la sección 2 presenta un pseudocódigo heurístico para la obtención de la población de soluciones iniciales; en la sección 3 se realiza la selección y generación de soluciones no dominadas y finales; y la sección 4 muestra los resultados experimentales mediante un instrumento computacional, el cual permite el logro efectivo y rápido de las soluciones.

DESARROLLO

1 Definición y formulación de las funciones objetivo

La mayoría de los modelos de localización parten de alternativas previamente concebidas, es decir, los modelos buscan el óptimo para una cantidad predeterminada de instalaciones. A diferencia de estas formulaciones, la metodología que se propone en esta investigación, permitirá conocer la ubicación de “n” almacenes intermedios entre los puntos de recogida y la compañía bajo enfoque multiobjetivo. Para que del modelo propuesto se obtenga como resultado el lugar donde ubicar y la cantidad óptima de almacenes intermedios, se requiere de una concepción

adecuada acorde a la realidad de las distintas funciones objetivo. Como primer paso para la definición de las funciones objetivo resulta necesario la conformación del equipo de trabajo (expertos). Para ello se seleccionaron, como miembros del equipo, a aquellos con conocimientos de la disciplina de logística, específicamente de los temas de localización de instalaciones y *trade off*, así como personal calificado y con experiencia.

La formulación de dichas funciones objetivos estuvo basada, fundamentalmente, en el juicio de los expertos, como se muestra en la Tabla 1 y el número de expertos se obtuvo a partir de la Expresión 1.

$$n_e = \frac{p(1-p)k}{i^2} \tag{1}$$

Donde:

n_e : Cantidad necesaria de expertos.

p : error estimado.

i : Precisión deseada en la estimación.

k : Constante computarizada que depende del nivel de confianza $(1-\alpha)$.

$(1-\alpha)$	K
0.90	2.6896
0.95	3.8416
0.99	6.6564

El número de expertos (ocho) fue calculado según la ecuación (1), estableciéndose para ello los valores siguientes: $p = 0,01$; $i = 0,1$ y $1-\alpha = 0,99$. Los valores de índice de consenso en la Tabla 1 fueron obtenidos a través de la Expresión 2 formulada por [8].

$$ICS_{ri} = (1 - \frac{s_{ri}}{s_L}) \times 100\% \tag{2}$$

Donde:

ICS_i : Índice de Consenso entre los expertos con relación a la función objetivo “i”.

s_L : Desviación estándar máxima posible. (Ver Tabla 2)

s_{ri} : Desviación estándar del juicio de los expertos con relación a la función “i”.

TABLA 1
Juicio emitido por los expertos para la formulación de las funciones objetivos en la ubicación de almacenes intermedios

Funciones Objetivo	Expertos								Valor Promedio	Índice de consenso
	1	2	3	4	5	6	7	8		
Costo de Transporte	5	5	5	5	5	4	5	5	4.857	85.86
Costo de Inversión	5	5	5	4	5	5	5	5	4.857	85.86
Costo de Inventario	3	2	3	3	3	2	1	3	2.429	70.57
Gasto de operaciones	2	2	2	1	1	3	2	2	1.857	74.18
Cantidad de envases a recoger	5	5	5	5	5	5	5	5	5.000	100.00

ESTRATEGIA DE LOCALIZACIÓN CON ENFOQUE MULTIOBJETIVO PARA ALMACENES INTERMEDIOS EN PROCESOS DE RECICLAJE DE ENVASES DE VIDRIO

Los valores en la tabla anterior varían de uno (1) a cinco (5), siendo (1) el valor más desfavorable referido a la inclusión de esa función objetivo en el modelo, y (5), valor más favorable a este suceso descrito.

TABLA 2
Valores de la desviación estándar máxima posible para el juicio de los expertos dados a las distintas funciones objetivo

n_e	7	8	9	10	11	12	13	14	15
s_L	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,6	2,5	2,5	2,5
	73	73	35	35	11	11	94	94	82

Como resultado del trabajo con los expertos en la valoración de las distintas funciones objetivos, se decidió establecer como funciones objetivos para el análisis de la localización de almacenes intermedios las funciones: Costo de Transportación, Costo de Inversión y Cantidad de envases a recoger; resultando irrelevante para este tipo de caso de estudio las restantes funciones consideradas. Para el caso de índice de consenso se consideró como adecuado, un índice mayor que el 85%, dicho valor límite se establece bajo la base de experiencias de aplicaciones en tesis doctorales, trabajos de diploma e innumerables proyectos de curso de estudiantes de Ingeniería Industrial.

1.1 Formulación de las funciones objetivo

Para las funciones objetivo definidas por los expertos se proponen las Expresiones 3, 4 y 5:

Costo de transportación

$$C_T = R_U \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m X_{c_{ij}} * X_{w_{ij}} \quad (3)$$

Donde:

C_T : Costo de transportación. (\$/día)

R_U : Gasto unitario de recorrido. (\$/Km.)

$X_{c_{ij}}$: Distancia desde el almacén "i" ubicado en la celda "j" hacia la compañía. (Km.)

n: Cantidad de almacenes intermedios a localizar.

m: Cantidad de celdas en se divide el territorio analizado.

$$X_{w_{ij}} = \begin{cases} 0 & \text{si no se localiza almacén int ermedio "i" en la celda "j"} \\ 1 & \text{si se localiza almacen int ermedio "i" en la celda "j"} \end{cases}$$

Costo de inversión

$$C_I = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m C_{i_{ij}} * X_{w_{ij}} \quad (4)$$

Donde:

C_I : Costo total de inversión.

$C_{i_{ij}}$: Costo de inversión del almacén intermedio "i" ubicado en la celda "j".

Cantidad de envases a recoger

$$I_P = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m X_{p_{ij}} * X_{w_{ij}} \quad (5)$$

Donde:

$X_{p_{ij}}$: Cantidad de envases potenciales a recoger por el almacén intermedio "i" localizado en la celda "j".

2 Obtención de la población inicial

La localización de almacenes intermedios mediante la propuesta de algoritmo evolutivo, se basa fundamentalmente en la división por celdas de un mapa de determinado territorio (ver Figura 1); a dichas celdas se le asocian los valores de las variables contempladas en funciones objetivos. Posteriormente, se generan $\begin{bmatrix} m \\ n \end{bmatrix}$ combinaciones posibles para localizar "n" instalaciones en "m" posibles celdas.

La solución a este número elevado de combinaciones se obtiene mediante la aplicación de algoritmos aleatorios, que permitirán ir combinando las distintas soluciones en busca de la adecuada, según los objetivos previamente establecidos.

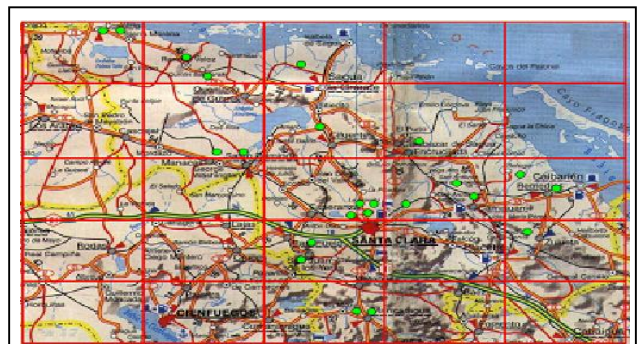


Figura 1 Representación geográfica de las celdas de una ciudad para la estrategia de localización con enfoque multiobjetivo.

El algoritmo propuesto consta de varios pasos, un primer paso en que se definen las expresiones de cálculo para las funciones objetivos y sus variables. Como segundo paso se propone un pseudocódigo heurístico, el cual permite la obtención de una población aleatoria de las soluciones iniciales. En el caso del tercer paso, se seleccionan las mejores soluciones de acuerdo a una función *fitness* que tiene en cuenta la dominancia Pareto. En el cuarto paso obtienen las distintas soluciones a través de un pseudocódigo genético, que permite la combinación de individuos o soluciones de forma tal que en su última generación obtenga la mejor.

Las decisiones de localización constituyen decisiones estratégicas en la gestión de la cadena de suministro, es por ello, que el desarrollo del algoritmo propuesto para la localización de instalaciones, incluirá en el próximo capítulo los niveles de consumo como $X_{p_{ij}}$. Esto se debe a que como las decisiones de localización se desarrollan en un período mayor de un año, la decisión debe tomarse en función de los niveles de consumo, como escenario máximo posible que pueden alcanzar los arribos de envases.

Los valores de las distintas variables contempladas en las funciones objetivo, se representarán en una matriz $M^{m \times 5}$, donde las filas representan las celdas desde uno hasta "m" y las columnas representan los valores siguientes:

Columna 1: Código de la fila en la segmentación del territorio objeto de estudio.

Columna 2: Código de la columna en la segmentación del territorio objeto de estudio.

Columna 3: Distancia desde el almacén “i” ubicado en la celda “j” hacia Sucursal. (Km.)

Columna 4: Costo de inversión del almacén intermedio “i” ubicado en la celda “j”.

Columna 5: Cantidad de envases potenciales a recoger por el almacén intermedio “i” localizado en la celda “j”.

Este algoritmo genera de una población inicial de forma aleatoria, con el objetivo de obtener individuos que se aproximen al conjunto de soluciones Paretos óptimas buscadas, además minimiza los tiempos de corridas en la cuarta etapa de procedimiento debido a su inminente complejidad. Para cada individuo de la población, el cual tendrá la forma de un vector donde cada elemento es el código de la cuadrícula, se realiza un sorteo para saber cuántos almacenes intermedios tendrá esa solución. El algoritmo heurístico se describe en la Tabla 3.

3 Generación de las soluciones finales

Se denomina como selección de las mejores soluciones del pseudocódigo 1 a la acción de completar con los mejores individuos de cada generación una población externa denominada archivo. El tamaño de dicho archivo es fijo y no varía durante las corridas del algoritmo. Inicialmente todos los individuos no dominados, cuyos *fitness* (ver Expresión 6) son menores que uno, son copiados al archivo según la Expresión 7.

$$F(i) = \frac{0.5 I_p - 0.25C_T - 0.25C_1}{F_T} \tag{6}$$

Donde:

F(i): Función *fitness* relativa al individuo o solución “i”.

F_T: Suma total de valores *fitness*

$$P_{t+1} = \left\{ i \mid i \in P_t + P_{t+1} \wedge F(i) < 0.25 \right\} \tag{7}$$

En caso de que la cantidad de individuos no dominados sea igual al tamaño establecido para el archivo ($|P_{t+1}| = \bar{N}$), la

etapa de la selección estará completa. En el caso de que no sea igual existirían dos posibilidades:

La cantidad de individuos no dominados es menor que el tamaño establecido para el archivo ($|P_{t+1}| < \bar{N}$).

La cantidad de individuos dominados es mayor que el tamaño establecido para el archivo ($|P_{t+1}| > \bar{N}$).

En el primer caso, se completa el archivo con los mejores ($\bar{N} - |P_{t+1}|$) individuos dominados en el archivo y la población de la generación anterior t. Esto se implementa

ordenando el multiconjunto $P_t + P_t$ de acuerdo a los

valores de *fitness* y copiando a P_{t+1} los primeros ($\bar{N} - |P_{t+1}|$) individuos “i” con *fitness* $F(i) \geq 1$. En el

segundo caso, cuando el tamaño del conjunto de no dominados es mayor a \bar{N} , un operador de truncamiento

remueve iterativamente los individuos de P_{t+1} hasta que el conjunto de no dominados sea igual al tamaño establecido

para el archivo ($|P_{t+1}| = \bar{N}$). El operador de truncamiento anteriormente mencionado garantiza que puntos valiosos de la frontera no sean perdidos, y lo realiza de la forma siguiente: el individuo que tiene la menor distancia euclidiana a otro es desechado en cada iteración. En caso de igualdad con otros individuos, se desempata considerando la segunda menor distancia del individuo al ser removido, y así sucesivamente.

La obtención de soluciones se realiza a través un pseudocódigo genético, el cual permite mediante generaciones, que partieron de un conjunto de soluciones iniciales (pseudocódigo 1), llegar a una solución óptima (ver Tabla 4) de acuerdo a la función *fitness* definida anteriormente.

Dentro de las variables que fueron definidas en las funciones objetivo, se encontraba la distancia que podía existir desde una celda “i” hasta la compañía. Los valores de esta variable se obtuvieron mediante el uso del *software MapInfo*

TABLA 3 Pseudocódigo heurístico para la obtención de la población inicial.
Algoritmo Heurístico de Iniciación de la Población Inicial
Leer parámetros: posibles soluciones, nind, nmin
Ordenar matriz de posibles soluciones de acuerdo al número de almacenes intermedios necesarios
Para i = 1 hasta nind
Generar un número aleatorio N entre nmin y nmax
Si N < nmin
N = nmin (el Nro. Mínimo de almacenes a ubicar para la solución inicial será nmin)
Fin si
Para j = 1 hasta N
Elegir una ubicación índice de la matriz de posibles soluciones
Inisolu (i, j) = posibles (índice)
Fin Para
Si N < nmax
Inisolu (i, j) = 0 para todo j que no contiene un almacén (esto es, N+1 ≤ i ≤ nmax)
Fin Si
Inicializar N = 0
Fin Para
Inisolu = Matriz de soluciones iniciales (dimensión nind x nmax)
Ordenar inisolu por columna
posibles: número de cuadrículas que los expertos tendrán en cuenta en el estudio
nind: números de individuos
nmin: número mínimo de almacenes a ubicar
nmax: número máximo de almacenes a ubicar

ESTRATEGIA DE LOCALIZACIÓN CON ENFOQUE MULTIOBJETIVO PARA ALMACENES INTERMEDIOS EN PROCESOS DE RECICLAJE DE ENVASES DE VIDRIO

Professional (ver Figura 2). Esta herramienta computacional permite cargar mapas de librerías gráficas de un determinado territorio.

El algoritmo evolutivo propuesto, para la localización con enfoque multiobjetivo, fue implementado en el lenguaje de programación *Borlan Delphi 7*, dicha implementación permitió la obtención rápida y efectiva de los resultados. En Figura 3 se aprecia la solución de la ubicación de almacenes intermedios, la compañía debe localizar un solo almacén intermedio para el intercambio de los envases de vidrio vacíos. Según el algoritmo propuesto, el almacén intermedio para los nuevos cambios debe ubicarse en la celda 14 (región de Camajuaní, municipio Villaclareño).

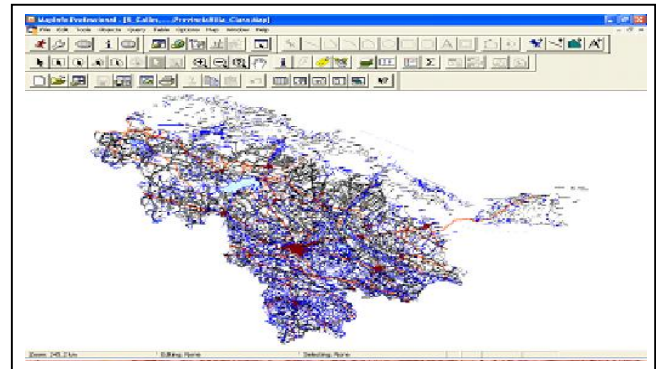


Figura 2 Interfaz software MapInfo Professional.

TABLA 4

Pseudocódigo para la solución final

Programa Principal SEA2

```

Leer los parámetros del SEA2: nind, nmin, nmax, ngen,
pm, pc, nprtrue
Generar una población usando el algoritmo heurístico
(Pseudocódigo 1)
Generar un archivo vacío (conjunto externo)
Para gen = 1 hasta ngen
  Eliminar almacenes repetidos del individuo
  Evaluar funciones objetivos de cada individuo de la
  población
  Asignar fitness a cada individuo de la población y del
  archivo
  Calcular todos los individuos no dominados de la
  población y del archivo
  Actualizar el archivo con los individuos no dominados
  Si el tamaño del archivo es mayor que nprtrue
    Reducir el tamaño con el operador de truncamiento
  Caso contrario
    Si el tamaño del archivo es menor que nprtrue
      Copiar los mejores individuos dominados del archivo y
      la población con fitness  $\geq 1$  al archivo de la nueva
      generación hasta que el tamaño del archivo sea igual a
      nprtrue
    Fin Si
    Si gen es menor que ngen
      Realizar torneo binario para seleccionar los individuos
      del archivo que formarán parte del conjunto de
      emparejamientos
      Realizar cruzamiento y mutación del conjunto de
      emparejamientos
      Actualizar la población del resultado del conjunto de
      emparejamientos
    Fin Si
    Incrementar contador de generaciones (gen = gen + 1)
  Fin Para
  Salvar el archivo (conjunto de no dominados)
ngen: número máximo de generaciones
pm: probabilidad de mutación
pc: probabilidad de cruzamiento
nprtrue: tamaño del archivo de no dominados
    
```



Figura 3 Interfaz del software desarrollado para el cálculo del algoritmo evolutivo propuesto.

CONCLUSIONES

La formulación de las decisiones de localización, basadas en paradigmas multiobjetivo y algoritmos evolutivos, constituye un aporte esencial en la valoración de este tipo de decisión estratégica en Cadenas de Suministro Inversa, permitiendo a su vez abordar las mismas con un enfoque integrador y coherente con las características de las organizaciones que la practiquen. Resulta válido aclarar que el trabajo desarrollado presenta un nuevo enfoque en la solución de los llamados *facility location problems*, teniendo en cuenta que los algoritmos heurísticos tradicionales [9], y otros ya convencionales [1], proporcionan soluciones monoobjetivo, limitando de este modo el carácter estratégico y predictor que se requiere a hora de tomar este tipo de decisión empresarial.

De acuerdo a los resultados obtenidos, se puede afirmar que la compañía obtendrá mejores dividendos a largo plazo con la aplicación de este trabajo. Teniendo a su vez, una herramienta inminentemente robusta, encaminada esencialmente a tener en cuenta soluciones valiosas, las cuales no resultarían posibles de obtener con otros métodos.



REFERENCIAS

- WEBER, Alfred. *Über den stanford der Industrien*. Mohr: Tubiteng, 1909.

2. KUEHN, A. A. y HAMBURGER, M.J. "A Heuristic Program for Locating Warehouses". *Management Science*. Vol. 9: 643-666, 1963.
3. BALINSKI, M. L. "On finding integer solutions to linear programs. In Proceedings of the IBM Scientific Computing Symposium on Combinatorial Problems". *IBM*: 225-248, 1966.
4. MANNE, A.S. "Plant location under economies of scale decentralization and computation." *Management Science*. Vol. 11: pag. 213-235, 1964.
5. STOLLSTEIMER, J. F. "The effect of technical change and output expansion on the optimum number, size and location of pear marketing facilities in a California pear producing region". PhD thesis. Berkeley, California: University of California, 1961.
6. STOLLSTEIMER, J. F. "A working model for plant numbers and locations". *Journal of Farm Economics*. Vol. 45: pag. 631-645, 1963.
7. ALMEIDA, C., AMARILLA, N. y BARÁN, B. *Optimización Multiobjetivo en la Planificación de Centrales Telefónicas*. XXIX Conferencia Latinoamericana de Informática CLEI2003, La Paz, Bolivia, 2003. p.
8. ABREU LEDÓN, R. "Modelo y procedimiento para la toma de decisiones de inversión sobre el equipamiento productivo en empresas manufactureras cubanas". (Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas). 2004.
9. COROMINAS, A. *Localización y Distribución en Planta*. España: Universidad de Cataluña, 1991.



Laboratorio de Logística y Gestión de Producción
Facultad de Ingeniería Industrial
CUJAE