Búsqueda Tabú para un Problema de Diseño Territorial con Máxima Dispersión

Jabneel R. Maldonado Flores
Programa de Posgrado de Ingeniería de Sistemas
Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Universidad Autónoma de Nuevo León
AP 111-F, Cd. Universitaria,
San Nicolás de los Garza, NL 66450, México
jabneel@yalma.fime.uanl.mx

Roger Z. Ríos Mercado
Programa de Posgrado de Ingeniería de Sistemas
Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Universidad Autónoma de Nuevo León
AP 111-F, Cd. Universitaria,
San Nicolás de los Garza, NL 66450, México
roger@yalma.fime.uanl.mx

Resumen

En el presente trabajo se describe la aplicación de una metodología de búsqeda tabú, con oscilación estratégica incorporada dentro de la fase de búsqueda local, a una problemática real que surge a partir de la aprobación de la norma ambiental Europea en 2003. En esta se estipula que la recolección y reciclaje de aparatos electrodomésticos es por ley obligatoria, siendo las mismas compañías fabricantes las encargadas de la recolección en un porcentaje proporcional al volumen de sus ventas en el mercado. Este problema se plantea como un problema de diseño territorial donde se desea agrupar o asignar los diferentes puntos de recolección (unidades básicas) a cada compañia recolectora (territorios). En contraste con el problema de diseño de territorios clásico, se busca crear territorios con máxima dispersión para cumplir con las leyes anti-monopolio, a la vez que se desea obtener territorios balanceados respecto al número de habitantes y calidad de la infraestructura presente en las zonas asignadas a cada compañía. Este enfoque permite describir un modelo matemático, visto como un problema de optimización combinatoria, que busca la maximización de una función de dispersión.

El carácter NP-duro del problema y el tamaño de las instancias reales justifican el uso de la metaheurística de búsqueda tabú propuesta. El método se evalúa en un conjunto de instancias de la literatura. Los resultados obtenidos indican la eficacia del uso de la oscilación estratégica durante la fase de búsqueda local para la obtención de soluciones factibles de buena calidad.

1. Introducción

Dentro del esquema de reciclaje aprobado en 2003 por la Unión Europea [2] existen diversos problemas que pueden atacarse utilizando técnicas propias del área de la investigación de operaciones. En particular nos enfocamos al diseño de territorios de recolección. El presente trabajo surge de una problemática real referente a la recolección de aparatos electrodomésticos con fines de reciclaje en la Unión Europea, donde por ley la recolección recae en las mismas compañías fabricantes en un porcentaje proporcional al volumen de sus ventas en el mercado.

En [3], Fernández et al. introdujeron el problema y establecieron el modelo matemático así como la complejidad del mismo. El nivel de complejidad NP-duro del problema, así como las dimensiones de las instancias para casos reales que se desean resolver hacen de los métodos heurísticos una opción viable de solución. El carácter anti-monopólico con que se aplica la normativa en algunos países, tales como Alemania y España, motivó el uso de un modelo matemático que busca maximizar una medida de dispersión. Cabe resaltar que dentro del campo de diseño territorial este es el único problema que se conoce donde se busca maximizar una medida de dispersión.

Buscando explotar las características propias del problema y hacer uso de mecanismos de memoria, se ha propuesto una metodología de solución basada en un esquema del tipo búsqueda tabú, que incorpora elementos básicos, un período tabú dinámico y el uso de un criterio de aspiración, así como características más avanzadas como oscilación estratégica y búsqueda en vecindarios compuestos.

El método se evalúa en un conjunto de instancias de la literatura. Los resultados obtenidos establecen el éxito de la oscilación estratégica durante la fase de búsqueda local para la obtención de soluciones factibles de buena calidad.

2. Descripción del Problema y Modelo Matemático

Deseamos crear una asignación de puntos de recolección (también referidos como unidades básicas) a compañías (territorios), de forma tal que permitan realizar una repartición eficiente y que a la vez satisfaga los siguientes requerimientos de planeación:

- Balance respecto al número de usuarios: Para lograr realizar una asignación justa cada territoro debe tener asignado un número equitativo de usuarios en un porcentaje proporcional al volumen de sus ventas en el mercado .

- Balance respecto a la calidad de las unidades básicas: Cada unidad básica tiene asociado un nivel de calidad de infraestructura, que puede ser buena, mediocre o mala. Buscamos que la asignación a los territorios sea balanceada respecto al número de unidades básicas de cada tipo, siempre en forma proporcional al volumen de sus ventas en el mercado.

- Límite de unidades básicas divididas: Ciertos aparatos electrodomésticos contienen sustancias anticongelantes, mismas que se consideran altamente contaminantes, por lo que deben ser transportados por separado del resto. Esta consideración conlleva una subdivisión en dos tipos de aparatos(productos), permitiendo una asignación independiente de cada tipo de producto. Sin embargo, el número de unidades básicas con asignación dividida de productos no puede sobrepasar un tope máximo.

- Leyes anti-monopolio: En países como Alemania y España existen leyes anti-monopolio, por lo que se busca que las unidades básicas asignadas a cada territorio se encuentren lo más alejadas posible entre sí. Esto se logra incorporando una función objetivo que maximiza la dispersión territorial.

A continuación se presenta la formulación del modelo como un problema de optimización combinatoria. *Conjuntos y Subíndices*

$C = \{1, \ldots, m\}$	Conjunto de territorios
$V = \{1, \ldots, n\}$	Conjunto de unidades básicas (UBs)
$P = \{1, 2\}$	Conjunto de tipos de producto
$Q = \{1, 2, 3\}$	Conjunto de índices de calidad (1=buena, 2=mediocre, 3=mala)
V^q	Conjunto de UBs con calidad q $q \in Q$, $V = V^1 \bigcup V^2 \bigcup V^3$

Parámetros

d_{ij}	Distancia euclídea entre las UBs i y j; $i, j \in V$
w_i	Cantidad de usuarios en la UB i; $i \in V$
S_k^p	Porcentaje del mercado del territorio k respecto al producto p
τ	Tolerancia permitida al balanceo respecto al número de usuarios ($\tau \in (0, 1)$)
β	Tolerancia permitida al balanceo respecto a la calidad de las UBs ($\beta \in (0, 1)$)
σ	Máximo número de UBs divididas permitidas

Parámetros Calculados

$w(\overline{V}) = \sum_{i \in \overline{V}} w_i$	Cantidad de usuarios en $\overline{V} \subset V$
$W = w(V)$	Cantidad total de usuarios en V
$c^q(\overline{V}) = \lvert \overline{V} \bigcap V^q \rvert$	Cardinalidad de $\overline{V}$ respecto a la calidad q; $\overline{V} \subset V$, $q \in Q$

Variables

X_k^p	Conjunto de UBs asignadas al territorio k respecto al producto p; $k \in C$, $p \in P$
$X_k = \bigcup_{p \in P} X_k^p$	Conjunto de UBs asignadas a la compañía k para al menos un producto p; $k \in C$, $p \in P$
$X^p = \{X_1^p, X_2^p, \ldots, X_m^p\}$	$m-$partición de V para un producto p; $p \in P$
X^s	Conjunto de UBs divididas, esto es, $i \in X^s \Leftrightarrow \exists k_1, k_2 \in C, k_1 \neq k_2$ tales que $i \in X_{k_1}^1 \wedge i \in X_{k_2}^2$
Π	Conjunto de todas las posibles m-particiones de V para un tipo de producto p dado; $p \in P$

Modelo

Encontrar $|P|$ m-particiones de la forma $X^p = \{X_1^p, X_2^p, \ldots, X_m^p\}$ tales que :

$$\max_{X^p \in \Pi} \min_{k \in C} \min_{i,j \in X_k} \{d_{i,j}\} \tag{1}$$

sujeto a:

$$\frac{1}{W} w(X_k^p) \leq (1 + \tau) \qquad k \in C, p \in P \tag{2}$$

$$\frac{1}{W} w(X_k^p) \geq (1 - \tau) \qquad k \in C, p \in P \tag{3}$$

$$\frac{1}{|V^q|} c^q(X_k^p) \leq (1 + \beta) \qquad q \in Q, k \in C, p \in P \tag{4}$$

$$\frac{1}{|V^q|} c^q(X_k^p) \geq (1 - \beta) \qquad q \in Q, k \in C, p \in P \tag{5}$$

$$|X^s| \leq \sigma \tag{6}$$

En el área de diseño territorial no existe una definición clásica del concepto de dispersión. Este modelo mide la dispersión dentro de un terrritorio como la mínima distancia euclídea entre todos los posibles pares de unidades básicas pertenecientes al territorio para al menos uno de los productos. La función objetivo (1) sigue un enfoque del tipo *maxmin*, esto es, busca maximizar la mínima de las medidas de dispersión de todos los territorios, para obtener así territorios con la mayor dispersión posible.

Debido a que es prácticamente imposible obtener territorios perfectamente balanceados, es de uso común considerar que un territorio se encuentra balanceado si presenta valores dentro de un intervalo controlado por un parámetro de tolerancia de desviación τ respecto a la medida perfecta de balaneo. Así entonces, diremos que un territorio k para el producto p está balanceado respecto al número de usuarios si cumple que :

$$w(X_k^p) \in [(1 - \tau) W S_k^p,\ (1 + \tau) W S_k^p]$$

Es importante resaltar que en nuestro caso el intervalo también se encuentra ponderado por el porcentaje del mercado del territorio.

Esta condición conlleva a las restricciones tipo (2) y (3) referentes al balanceo respecto al número de usuarios. Siguiendo un enfoque similar se llega a las condiciones del tipo (4) y (5) mediante las cuales buscamos repartir de manera equitativa las unidades básicas respecto a la calidad de la infraestructura. En éstas se usa β como factor de tolerancia.

Por último, la restricción (6), controla que el número de unidades básicas donde se presenta asignación dividida respecto al tipo de productos no exceda a σ.

3. Búsqueda Tabú

El problema es NP-duro [3]. Lo anterior junto con el tamaño de las instancias reales que se desean resolver, hacen que los tiempos de ejecución utilizando métodos exactos sean prohibitivos. Por tal motivo se propone un algoritmo heurístico basado en el esquema de búsqueda tabú [4].

Como toda metodología heurística la búsqueda tabú no garantiza optimalidad global. Sin embargo, aunque no existe una prueba teórica de convergencia, los buenos resultados obtenidos en diversos problemas de optimización combinatoria han convertido rápidamente a la búsqueda tabú en un método muy atractivo. En particular, dentro del área de diseño teritorial, trabajos como el desarrollado por Bozkaya et al. [1] han mostrado un desempeño eficiente.

El procedimiento se caracteriza por el uso sistemático de estructuras de memoria a corto y largo plazo que guían la búsqueda en el espacio de soluciones, dentro de una fase iterativa de búsqueda local por vecindarios.

Partiendo de una solución inicial dada, en cada iteración t el método se mueve de la solución actual (X_t) a la mejor solución del vecindario creado $(X_{t+1} \in \aleph(X_t))$. Con la esperanza de salir de posibles óptimos locales se permiten movimientos que empeoren la función de aptitud, dado que la nueva solución no necesariamente mejora la anterior, para evitar la creación de ciclos algunas soluciones o atributos de las mismas son declarados prohibidos o tabú por un número θ de iteraciones también llamado período tabú. Este mecanismo es conocido como memoria a corto plazo. Algoritmos más complejos pueden incluir el uso de elementos como la intensificación y diversificación, ver [5].

A continuación se proporciona una descripción de los elementos básicos del algoritmo propuesto. La función de aptitud que buscamos maximizar durante el procedimiento es la siguiente :

$$\begin{aligned} F(X^p) \quad = \quad & \hat{f}(X^p) - \delta_\tau f_\tau(X^p) \\ & -\delta_\beta f_\beta(X^p) - \delta_s f_s(X^p) \end{aligned} \qquad (7)$$

donde $\hat{f}(X^p)$ es la función objetivo (1) normalizada. Las $f_r(X^p)$ con $r \in \{\tau, \beta, s\}$ son funciones también normalizadas que miden el grado de infactibilidad respecto a las restricciones de balance sobre el número de usuarios (2)-(3), la calidad de la infraestructura (4)-(5), y el número de unidades básicas dividas excedentes (6), respectivamente. La idea principal detrás de la función (7) es, basado en el concepto de oscilación estratégica, relajar estas restricciones e incorporarlas en la función objetivo con un factor de penalización que varía dinámicamente, con la finalidad de permitir mayor flexibilidad en la región de búsqueda.

Los multiplicadores δ_r son entonces parámetros auto ajustables. Inicializados en 1 y que como su nombre lo indica reajustan su valor, cada μ_r número de iteraciones, de acuerdo a la siguiente regla: Si todas las $\overline{\mu}_r$ soluciones anteriores fueron infactibles $\delta_r = \gamma\,\delta_r$, si por el contrario fueron todas factibles $\delta_r = \frac{1}{\gamma}\,\delta_r$, en cualquier otro caso δ_r se mantiene sin cambios. El factor de crecimiento γ y los valores μ_r y $\overline{\mu}_r$ son parámetros fijos controlados por el usuario.

Se cuenta con 3 tipos de movimientos distintos :

- $mov_{A1}(i, k_2)$. Reasignar la UB i del territorio k_1 donde está asignada actualmente a un nuevo territorio k_2, para todos los productos; $k_1 \neq k_2$.
- $mov_{A2}(i, k_2, p)$. Reasignar la UB i del territorio k_1 donde está asignada actualmente a un nuevo territorio k_2, respecto al producto p. Se permite la división de UBs; $k_1 \neq k_2$.
- $mov_B(i, j, p)$. Intercambiar las UBs i, j asignadas a territorios distintos, respecto al producto p.

Para cada movimiento se tienen atributos que pueden ser considerados tabú. En los movimientos mov_{A1} y mov_{A2} se considera tabú la pareja formada por la unidad básica y el territorio al que pertenecía originalmente, mientras que para el movimiento mov_B la pareja de unidades básicas intercambiada es considerada tabú.

Cada tipo de movimiento por si mismo genera un vecindario de búsqueda $\aleph_{A1}$, $\aleph_{A2}$ y $\aleph_B$, respectivamente. Además de estos vecindario sencillos definimos otros dos compuestos. $\aleph_{C1}$ formado por la exploración secuencial de los vecindarios en el siguiente orden $\aleph_{A2} \rightarrow \aleph_{A1} \rightarrow \aleph_B$ y $\aleph_{C2}$ por la unión de los tres.

Dado que los vecindarios son de tamaño polinomial se optó por una estrategia del tipo mejor vecino encontrado para seleccionar la nueva solución. Una vez seleccionada la nueva solución sus correspondientes atributos pasan a formar parte de la lista tabú por θ iteraciones. Además del uso de la lista tabú otro mecanismo eficiente para evitar la creación de ciclos es el uso del período tabú dinámico, que consiste en generar el valor θ de forma aleatoria en el intervalo $[\theta_{max}, \theta_{min}]$, con θ_{max} y θ_{min} definidos por el usuario.

Con la finalidad de no perder posibles buenas soluciones el algoritmo propuesto incorpora el siguiente criterio de aspiración; si el valor de aptitud del mejor vecino encontrado es mejor que el de la mejor solución encontrada hasta el momento, realizamos el moviemiento aunque éste sea considerado tabú.

La fase de búsqueda local continua hasta que se satisfaga alguno de los siguiente criterios de paro: tiempo máximo de ejecución, máximo número de iteraciones permitidas o un gap de optimalidad relativo a una cota superior del problema.

`Inicializar :`
    $T(0) \leftarrow \emptyset$
    $\delta_r \leftarrow 1$, $r \in \{\tau, \beta, s\}$
    $t \leftarrow 0$
`Obtener una solución inicial` $\hat{X}_0^p = (X^p)_{t=0}$
$X^{best} = \hat{X}_0^p$
`Mientras (no se cumpla algún criterio`
        `de paro) {`
    $t \leftarrow t + 1$
    `si` $(t \, mod \, \mu_r = 0)$
        `actualizar` δ_r
    `Seleccionar el mejor vecino`
        $\tilde{X} \in \aleph(\hat{X}_t^p, t) = \aleph(\hat{X}_t^p) \backslash \tilde{T}(t)$
    $\hat{X}_t^p \leftarrow \tilde{X}$
    `Generar` $\theta \in [\theta_{max}, \theta_{min}]$ `aleatorio`
    `Actualizar` $T(t)$
    `si` $\hat{X}_t^p$ `mejora` X^{best}
        $X^{best} \leftarrow \hat{X}_t^p$
`Regresar` X^{best}

Algoritmo 1: Búsqueda Tabú

En Algoritmo 1 se muestra el pseudocódigo del método. X^{best} es la mejor solución encontrada hasta el momento y t es el número de iteraciones. $T(t)$ corresponde al conjunto de vecinos considerados tabú en la iteración t y $\tilde{T}(t) = T(t) \bigcup A$ con A el conjunto de soluciones que satisfacen el criterio de aspiración para la solución actual.

La solución inicial $\hat{X}_0^p$ se obtiene usando el proceso constructivo descrito por Fernández et al. [3]. En el proceso de selección del mejor vecino, $\aleph(\cdot)$ hace referencia a cualquiera de los vecindarios descritos anteriormente, y $\tilde{X}$ satisface que $F(\tilde{X}) > F(Y)$ para todo $Y \in \aleph(\hat{X}_t^p, t)$.

Decimos que una solución X_i mejora a X^{best} en cualquiera de los siguientes casos :

- Si una vez alcanzada factibilidad se cumple que $f(X_i) > f(X^{best})$ y X_i es a su vez una solución factible.

- Si hasta el momento no se ha encontrado ninguna solución factible, X_i mejora a X^{best} si es factible o si decrece el nivel de infactibilidad.

Al finalizar el algoritmo regresa X^{best}, la mejor solución encontrada durante la búsqueda.

4. Resultados Computacionales

Como toda búsqueda tabú el desempeño del método aquí propuesto se encuentra estrechamente ligado a los valores asignados a los parámetros controlados por el usuario. Actualmente nos encontramos en fase de experimentación para la calibración de los mismos. En esta sección presentamos los resultados preliminares obtenidos hasta el momento.

Para los experimentos se usan las instancias de la base de datos y el algoritmo constructivo P1 de [3], con los parámetros α =0.2 y λ =0.5. Para identificar las instancias se utiliza la notación n_p_x, donde n, p y x denotan el número de UBs, territorios e instancia, respectivamente.

Los parámetros utilizados durante la experimentación son τ =0.05, β =0.20, θ_{max} =15, θ_{min} =5, $\gamma = 1{,}5$, $\mu_r = 10$ y $\overline{\mu}_r = 3$. El simbolo (*) denota que la mejor solución reportada no alcanzó factibilidad, mientras que (†) denota que se la solución encontrada es óptima.

En un primer experimento se desea evaluar el comportamiento de la oscilación estratégica.

Para tal efecto se ejecutó la búsqueda tabú con 3000 iteraciones y $\aleph(\cdot) = \aleph_{C1}$.

La Tabla 1 muestra el valor de la función objetivo cuando la heurística se ejecuta sin (columna NOE) y con (columna OE) el uso de la oscilación estratégica. Puede observarse que en la mayoría de los casos el uso de la oscilación estratégica nos lleva a obtener valores objetivo mejores, especialmente para las intancias más grandes. Incluso en tres instancias el uso de la OE permite encontrar valores óptimos. Más aún, es primordial destacar que en ninguna de las instancias resueltas sin utilizar la oscilación estratégica se logro obtener factibilidad, este hecho por sí mismo resalta la eficacia de esta estrategia para guiar la búsqueda.

Tabla 1: Evaluación de la oscilación estratégica.

Instancia	**NOE**	**OE**
200_4_1	* 2.72	1.76
200_4_2	* 0.78	0.89
200_4_3	* 4.03	2.98
200_5_1	* 2.10	2.15
200_5_2	* 1.25	1.05
200_5_3	* 5.28	†5.28
200_6_1	* 2.82	2.86
200_6_2	* 1.27	1.25
200_6_3	* 6.01	5.93
200_7_1	* 3.80	2.64
200_7_2	* 0.83	1.27
200_7_3	* 6.00	†6.13
300_4_1	* 4.13	3.52
300_4_2	* 3.40	†4.36
300_5_1	* 4.12	5.07
300_5_2	* 1.72	4.89
300_6_1	* 3.39	4.32
300_6_2	* 2.64	5.42
300_7_1	* 3.39	4.50
300_7_2	* 1.72	6.22

En la Tabla 2 se presenta una comparación del desempeño de los vecindarios $\aleph_{C1}$ y $\aleph_{C2}$, aplicados a la resolución de un subconjunto de las instancias de prueba. Se ejecutó el algoritmo con 3000 iteraciones. El GAP de optimalidad se calculó utilizando la mejor cota superior conocida.

Tabla 2: Desempeño de vecindarios $\aleph_{C1}$ y $\aleph_{C2}$.

Instancia	$\aleph_{C1}$	GAP	$\aleph_{C2}$	GAP
100_4_1	2.83	0.37	2.46	0.46
100_4_2	2.7	0.31	3.29	0.16
100_4_3	†5.64	0.0	†5.64	0.0
100_5_1	3.39	0.40	2.99	0.47
100_5_2	3.71	0.16	4.17	0.06
100_5_3	5.09	0.11	5.64	0.01
100_6_1	3.39	0.49	4.10	0.39
100_6_2	2.07	0.57	4.05	0.17
100_6_3	4.66	0.35	6.44	0.10
100_7_1	2.49	0.66	3.38	0.54
100_7_2	4.33	0.26	3.81	0.35
100_7_3	5.21	0.28	6.61	0.08
200_4_1	1.76	0.35	2.15	0.21
200_4_2	0.89	0.34	1.05	0.22
200_4_3	2.98	0.37	4.03	0.15
200_5_1	2.15	0.30	2.12	0.31
200_5_2	1.05	0.39	0.96	0.44
200_5_3	†5.28	0.0	4.63	0.12
200_6_1	2.86	0.23	2.12	0.43
200_6_2	1.25	0.38	1.55	0.24
200_6_3	5.93	0.01	†6.01	0.00
200_7_1	2.64	0.38	2.72	0.36
200_7_2	1.27	0.41	1.5	0.30
200_7_3	†6.13	0.0	†6.13	0.0
300_4_1	3.52	0.30	3.71	0.26
300_4_2	†4.36	0.0	4.30	0.01
300_5_1	5.07	0.12	5.04	0.13
300_5_2	4.89	0.12	5.01	0.10
300_6_1	4.32	0.37	5.30	0.22
300_6_2	5.42	0.21	5.42	0.21
300_7_1	4.50	0.43	4.66	0.41
300_7_2	6.22	0.11	6.85	0.02
Promedio		0.22		0.27

Como se puede apreciar en la tabla, para todas las instancias ambas estrategias de exploración obtuvieron soluciones factibles. Siendo $\aleph_{C1}$ la que obtiene más valores óptimos. Sin embargo, en términos generales se observa un mejor desempeño del vecindario $\aleph_{C2}$, conlusión que es respalda por un GAP promedio de 0.22, mientras que el de $\aleph_{C1}$ es de 0.27 .

Cabe mencionar que en ambos experimentos, en todos los casos la fase constructiva no fue capaz de obtener una solución inicial factible. Esto muestra la efectividad de las fases de búsqueda local propuestas para corregir infactibilidades.

5. Conclusiones

Se propuso una metodología de búsqueda tabú aplicada a un problema de diseño territorial con máxima dispersión poco explotado dentro de la literatura especializada. Los resultados obtenidos muestran la importancia del uso de la oscilación estratégica dentro de la fase de búsqueda local, permitiendo obtener soluciones factibles para todas las instancias utilizadas. Cabe resaltar que cuando la oscilación estratégica no se usa el método tiene muchas dificultades en encontrar soluciones factibles. Esto demuestra la valía de la oscilación estratégica en la solución del problema tratado.

Asímismo se evaluaron dos vecindarios compuestos para realizar la búsqueda local, resultando $\aleph_{C2}$ el más apto. Como trabajo a futuro se propone el ajuste paramétrico del método y la validación estadística del desempeño del método.

Agradecimientos: Este trabajo de investigación ha sido apoyado económicamente por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México (apoyo SEP-CONACYT 48499-Y) y por la Universidad Autónoma de Nuevo León (apoyo UANL-PAICYT CE012-09). Se agradecen los comentarios vertidos por un revisior anónimo.

Referencias

[1] B. Bozkaya, E. Erkut y G. Laporte. A tabu search heuristic and adaptive memory procedure for political districting. *European Journal of Operational Research*, 144(1):12-26,2003.

[2] European Parliament and of the Council Directive 2002/96/EC of the European Parliament and of the Council of 27 January 2003 on waste a electrical and electronic equipment (WEEE) - Joint declaration of the European Parliament, the Council and the Commission relating to Article 9. Official Journal L 037, pp. 0024 - 0039, 13/02/2003. *http://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:32002L0096:EN:HTML*.

[3] E. Fernández, J. Kalcsics, S. Nickel, y R. Z. Ríos-Mercado. A novel maximum dispersion territory design model arising in the implementation of the WEEE-directive. *Journal of the Operational Research Society*, 61(3): 503-514, 2010.

[4] F. Glover. Tabu search-part I. *ORSA Journal on Computing*, 1(3): 190-206, 1989.

[5] F. Glover y M. Laguna. *Tabu Search*. Springer-Verlag, Berlín, Alemania, 1998.