

MODELO MATEMÁTICO PARA UNA LOCALIZACIÓN ÓPTIMA DE PLANTAS DE SEPARACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

Marta Cecilia Vidal (*), Rossana Epulef

* Universidad Tecnológica Nacional (FRBB). Departamento de Matemática, Universidad Nacional Del Sur (UNS), Bahía Blanca, Argentina.

RESUMEN

El crecimiento poblacional deriva en un marcado aumento de la generación de residuos sólidos urbanos (RSU), estos no sólo conllevan a un problema ambiental sino que también son un recurso que se debe aprovechar y así favorecer la economía circular.

En la implementación de un Sistema de Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos (GIRSU), que considera diversas etapas como la generación, almacenamiento, recolección, transferencia, transporte, recuperación, reciclaje y disposición final, las plantas de separación de residuos (PSR) constituyen un eslabón esencial para un manejo eficiente de los mismos, permitiendo entre otros beneficios, no sólo el aprovechamiento del residuo sino un ahorro económico en el transporte debido a que sólo la fracción no recuperable se transportará al sitio de disposición final. Por lo tanto es fundamental contar con plantas de separación bien planificadas y adecuadamente ubicadas. Como consecuencia se necesitan aplicar metodologías prácticas, eficientes y de bajo costo.

En este trabajo se presenta un modelo matemático para el problema de instalación de plantas de separación de residuos sólidos urbanos, a partir del cual se busca minimizar el costo de instalación de las mismas a la vez que se deben cumplir ciertas restricciones. Se describen en detalle tanto las variables como los parámetros y las restricciones que forman parte del modelo. El problema resultante es un problema de programación lineal entero mixto cuya solución brinda la cantidad óptima de plantas a instalar y los sitios definitivos de ubicación de las mismas a un costo mínimo. En base a los resultados satisfactorios obtenidos en ciudades ficticias se plantea aplicar el modelo a un problema real.

PALABRAS CLAVE: Residuos sólidos urbanos, plantas de separación, modelos matemáticos, optimización.

ABSTRACT

Population growth results in a marked increase in the generation of urban solid waste (MSW), these not only leads to an environmental problem but also are resources to be made use of and thus favor the circular economy.

In the implementation of an integrated solid waste management (ISWM) which considers different stages such as generation, storage, collection, transfer, transport, recovery, recycling and final disposal, the waste separation plants (WSP) constitute an essential link for an efficient management of them, allowing among other benefits, not only the use of the waste but an economic saving in transportation because only the non-recoverable fraction will be transported to the final disposal site. It is therefore essential to have well-planned and adequately located separation plants. As a consequence, practical, efficient and low-cost methodologies need to be applied.

This paper presents a mathematical model for the problem of installing solid urban waste separation plants, from which the cost of installing them is minimized while certain restrictions must be met. The variables, parameters and constraints that are part of the model are described in detail. The resulting problem is a mixed integer linear programming problem whose solution provides the optimal number of plants to be installed and the final location sites at a minimum cost. Based on the satisfactory results obtained in non real cities, the model will be implement to the solution of a real case.

KEYWORDS: Urban solid waste, sorting plants, mathematical models, optimization.

INTRODUCCIÓN

El rápido incremento de la cantidad de residuos, como consecuencia natural del crecimiento poblacional, se ha convertido en un tema de suma preocupación para las autoridades municipales. Un manejo inadecuado de los residuos sólidos urbanos constituye uno de los problemas más difíciles de resolver en la mayoría de las ciudades, los impactos ambientales negativos afectan no sólo a la sociedad actual sino a las futuras generaciones por la degradación del entorno, las enfermedades asociadas y los efectos sobre el calentamiento global, entre otros. Para que una gestión integral de residuos sólidos urbanos sea eficiente se debe considerar que en las distintas etapas como la generación, almacenamiento, recolección, transferencia, transporte, recuperación, reciclaje y disposición final se tomen decisiones adecuadas con el fin de contribuir al cuidado de medio ambiente. Para esto es importante contar con planes que consideren la separación de

residuos en los hogares y con plantas de clasificación de residuos que permitan recuperar materiales reciclables y reincorporarlos como materia prima el ciclo productivo. Sin duda una selección adecuada del sitio en donde ubicar dichas plantas es una clave fundamental tanto desde el punto de vista operativo como económico. La decisión del sitio requiere la realización de un análisis que permita, entre todas las alternativas existentes elegir la óptima. En tal sentido, la matemática ofrece numerosos instrumentos para realizar de manera eficiente dicha elección.

OBJETIVOS

El objetivo fundamental de este trabajo es presentar un modelo matemático de optimización que representa el problema de localización de plantas de separación de residuos sólidos urbanos en una zona determinada. En el mismo se consideran las diferentes zonas generadoras de residuos, la cantidad de residuos que se generan en cada zona y los costos de funcionamiento, operación e instalación de plantas. Se tienen en cuenta también las distancias entre las zonas generadoras de residuos y los posibles sitios en los cuales se instalarán las plantas como asimismo las distancias hacia los rellenos sanitarios existentes. El problema resultante es un problema de programación lineal entero mixto. La solución del mismo brinda la cantidad óptima de plantas a instalar y los sitios definitivos de ubicación de las mismas a un costo mínimo. Asimismo se obtiene la cantidad de residuos que se deben transportar desde cada zona a cada planta y desde cada planta a los sitios de disposición final.

METODOLOGÍA

A los efectos de formular el modelo matemático, el área de estudio se divide en zonas (barrios, delegaciones municipales, etc.), a este conjunto de zonas lo denotamos como $Z = \{1, \dots, z\}$. Ya sea por las características del suelo o por su entorno, no todas estas zonas son aptas para ubicar una planta de separación de residuos, el conjunto de aquellas zonas que son aptas se denota con $A = \{1, \dots, a\}$. Por otra parte el modelo contempla distintos tipos de PSR, se define como $P = \{1, \dots, p\}$ al conjunto de las distintas clases de plantas, y el conjunto de rellenos sanitarios existentes se denota como $R = \{1, \dots, r\}$.

Para formular el modelo matemático se deben definir claramente las variables y los parámetros involucrados en el problema, la función objetivo que se debe minimizar y las restricciones que se deben verificar.

Las variables se definen de la siguiente manera:

$x(z,a,p)$: cantidad de residuos transportados desde la zona z a la planta p ubicada en el sitio a .

$y(z,r)$: cantidad de residuos transportados desde el sitio z al relleno sanitario r .

$w(a,r)$: cantidad de residuos transportados desde la planta ubicada en el sitio a al relleno sanitario r .

$B(a,p)$ = $\begin{cases} 1 & \text{si se abre una planta del tipo } p \text{ en el sitio } a \\ 0 & \text{caso contrario} \end{cases}$

Los parámetros involucrados se definen como sigue:

$CI(a,p)$: costo de instalación de la planta p en el sitio a .

$CF(a,p)$: costo de funcionamiento de la planta p en el sitio a .

$CO(a,p)$: costo de operación de la planta p en el sitio a .

$d(a,p)$: distancia entre los sitios a y p .

$CT(z,p)$: costo de transporte entre los sitios z y p .

$P(z)$: producción de residuos de la zona z .

$r(p)$: tasa de recuperación de residuos de la planta p .

u y L : número máximo y mínimo de plantas de separación de residuos permitidas.

Dominio de las variables:

$$x(z,a,p) \geq 0 \quad \forall z \in Z, a \in A, p \in P$$

$$y(z,r) \geq 0 \quad \forall z \in Z, r \in R$$

$$w(a,r) \geq 0 \quad \forall a \in A, r \in R$$

$$B(a,p) \in \{0,1\} \quad \forall a \in A, p \in P$$

El proceso de localización óptima de plantas se modela matemáticamente de la siguiente manera:

Función objetivo:

$$\begin{aligned} \min c = & \sum_a \sum_p (CI(a,p) + CF(a,p)) B(a,p) + \sum_z \sum_a \sum_p x(z,a,p) CO(a,p) + \\ & + \sum_z \sum_a \sum_p x(z,a,p) d(z,a) CT1(z,a) + \\ & + \sum_z \sum_r y(z,r) d(z,r) CT2(z,r) + \\ & + \sum_a \sum_r w(a,r) d(a,r) CT3(a,r) \end{aligned} \quad (1)$$

Restricciones:

$$\begin{aligned} \sum_a \sum_p x(z,a,p) + \sum_r y(z,r) &= P(z) \quad \forall z \in Z \\ \sum_z \sum_p x(z,a,p) &= \sum_r w(a,r) + \sum_z \sum_p x(z,a,p) r(p) \quad \forall a \in A \\ u &\leq \sum_a \sum_p B(a,p) \leq L \\ \sum_z x(z,a,p) &\leq c(a,p) \quad \forall a \in A, p \in P \\ \sum_z y(z,r) + \sum_a w(a,r) &\leq cr(r) \quad \forall r \in R \\ \sum_a B(a,p) &= 1 \quad \forall p \in P \end{aligned} \quad (2)$$

La función objetivo (1) representa los distintos costos, de instalación, de funcionamiento y de transporte. El problema formulado es un problema de programación lineal entero mixto, lo cual significa que algunas de las variables involucradas son enteras y otras son continuas. Los algoritmos para resolver esta clase de problemas son más complejos que aquellos en los cuales las variables son sólo continuas. Los métodos más eficientes están basados en técnicas Branch and Bound, cuya principal característica es que realizan una búsqueda inteligente de soluciones factibles, eliminando aquellas que no pueden conducir a un óptimo.

RESULTADOS

En una primera instancia se aplicó el modelo anterior a distintas ciudades ficticias obteniendo resultados promisorios. Se presenta aquí un ejemplo, en el cual se consideran 7 zonas generadoras de residuos de las cuales 3 son aptas para instalar una planta de separación. Las zonas aptas son z2, z6 y z7 que se denominan a1, a2 y a3 respectivamente. Se contemplaron 3 clases diferentes de plantas p1, p2 y p3 y un relleno sanitario (RS) ya existente. Considerando como otros datos el número de habitantes de cada zona, la producción per cápita de residuos (ton/hab), los distintos costos y las distancias entre las distintas zonas y los posibles lugares en donde se instalarán las plantas. Se elaboraron los archivos de datos y se resolvió el problema mediante el software GAMS utilizando el solver CPLEX.

En la figura siguiente se puede observar la región considerada, la localización de las plantas de separación y del relleno sanitario ya existente. De acuerdo a los datos considerados, los resultados muestran que la solución óptima se obtiene localizando una planta del tipo 3 en la zona apta 6 y una planta del tipo 1 en la zona apta 7.

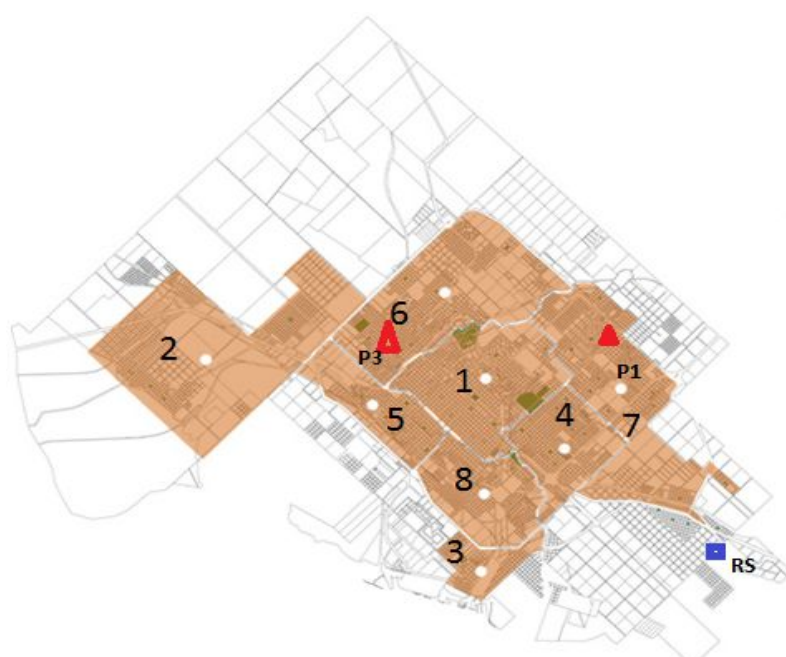


Figura 1. Localización de plantas.

Por otro lado la solución obtenida indica que las zonas z1, z2, z5 y z6 deben enviar sus residuos a la planta p3 instalada en la zona apta a2, mientras que las zonas z1, z4 y z7 lo deben enviar a la planta p1 instalada en a3. Las zonas z3 y z8 envían sus residuos directamente al relleno sanitario, en el cual también se dispone de una planta de separación de residuos.

Este modelo se prevé aplicarlo a la ciudad de Bahía Blanca, una ciudad de mediana escala con 301.572 habitantes (INDEC, Censo 2010). Por su magnitud poblacional se ubica en el decimoquinto centro más poblado de la Argentina. Se divide, como la mayoría de las ciudades, en distintas zonas de acuerdo al ejido urbano y a los usos del suelo entre otros factores. Cada zona o distrito tiene una característica particular y por supuesto tanto la generación de residuos como la recolección están ligados a estas características.

CONCLUSIONES

Se propuso un método cuantitativo que permite resolver, a muy bajo costo, un problema de sumo interés en la realidad como es una adecuada localización de plantas de separación de residuos sólidos urbanos. Si bien el modelo es de muy fácil resolución, sin duda que la tarea más difícil es la obtención de datos reales, algunos de ellos no son fáciles de obtener y deben ser estimados. El modelo se aplicó a distintas ciudades ficticias y se prevé aplicarlo a un problema real.

Asimismo, el modelo es una herramienta útil para implementar modelos de regionalización en la gestión de residuos sólidos urbanos en todas sus etapas, que lleven a varias comunidades a utilizar como destino final un único relleno sanitario. Se considera la instalación de plantas de separación de residuos, estaciones de transferencia y el sitio de disposición final de residuos sólidos urbanos.

Aunque el modelo propuesto no es una solución definitiva a este problema, es una herramienta rápida económica y útil al momento de apoyar un proceso de decisión de una gestión de residuos sólidos urbanos.

REFERENCIAS

1. "Por qué y cómo desarrollar estrategias de economía circular en el ámbito regional" (2017). Madrid. Fundación para la economía circular.
[Disponible en http://economiacircular.org/DOCUMENTACION/Publicaciones/Monografias/201703_Por_qué_y_cómo.pdf].
2. Galvan Meraz F., Santín Del Río, L. "Asociacionismo Intermunicipal". *Arlequín Editorial. México*, noviembre de 2012.
3. Ghiani G.; Lagana D., Manna E., Musmanno R., Vigo D. "Operations research in solid waste management: A survey of strategic and tactical issues". *Computers and Operational Research*, 44(2014) 22-32.
4. Li. Y., Huang, G. Nie, S "A mathematical model for identifying an optimal waste management policy under uncertainly". *Applied Mathematical Modelling*, 36 (2012) 2658-2673.
5. Hao, Y., Wei, D., Shiyun, L. "Optimization of long-term performance of municipal solid waste management system: a bi-objective mathematical model". *International Journal of Energy and Environment*, 6(2015) 153-164.
6. Kharat, M. G., Kamble, S.J., Raut, R.D. and Kamble, S.S. (2016). Identification and evaluation of landfill site selection criteria using a hybrid Fuzzy Delphi, Fuzzy AHP and DEMATEL based approach. *Modeling Earth Systems and Environment*, 2(2), 1-13.
7. Mendoza, J., "Beneficios derivados de la regionalización de la gestión sub-nacional en los aglomerados urbanos". Banco Interamericano de Desarrollo, División de Gestión Fiscal y Municipal. Argentina, octubre de 2010.
8. Nemhauser, G and Wolsey, L. Integer and Combinatorial Optimization. *Wiley-Interscience New York*, 1988. ISBN: 0-471-82819
9. Sane-Zerang E., Tavakkoli-Moghaddam R. and Heydarian H. "A bi-objective model for the capacity and location of landfills for municipal solid wastes". *International Journal of Industrial Engineering & Production Research*, 27 (2016) 233-242.