

Localización de depósitos internos para residuos sólidos hospitalarios utilizando técnicas multicriterio¹

Location of internal deposits of hospital solid waste using multicriteria techniques²

Localização de depósitos internos para resíduos sólidos hospitalares utilizando técnicas multicritério³

*Pablo César Manyoma-Velásquez⁴
Mayra Alejandra Pardo-Colorado⁵
Patricia Torres-Lozada⁶*

SICI: 0123-2126(201307)17:2<443:LDIRSH>2.0.TX;2-3

¹ Fecha de recepción: 29 de mayo de 2012. Fecha de aceptación: 28 de febrero de 2013. Este artículo fue desarrollado por la Escuela de Ingeniería Industrial y la Escuela de Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente de la Universidad del Valle, Cali, Colombia.

² Received: May 29, 2012. Accepted: February 28, 2013. This article was developed by the School of Industrial Engineering and the Engineering School of Natural Resources and Environment, University of Valle, Cali, Colombia.

³ Data de recebimento: 29 de maio de 2012. Data de aceitação: 28 de fevereiro de 2013. Este artigo foi desenvolvido pela Escola de Engenharia Industrial e a Escola de Engenharia de Recursos Naturales y del Ambiente, da Universidad del Valle, Cali, Colômbia.

⁴ Ingeniero industrial de la Universidad Autónoma de Occidente, Cali, Colombia. Magíster en Ingeniería, con énfasis en Ingeniería Industrial, de la Universidad del Valle, Cali, Colombia. Estudiante de doctorado en Ingeniería, con énfasis en Ingeniería Sanitaria y Ambiental, de la Universidad del Valle, Cali, Colombia. Profesor asociado de la Universidad del Valle, Cali, Colombia. Correo electrónico: pablo.manyoma@correounivalle.edu.co.

⁵ Ingeniera industrial, de la Universidad del Valle, Cali, Colombia. Correo electrónico: mayralizeth28@gmail.com

⁶ Ingeniera sanitaria, de la Universidad del Valle, Cali, Colombia. MSc. en Ingeniería Civil, Universidad de Sao Paulo, Sao Paulo, Brasil. Ph. D. en Ingeniería Civil, Universidad de São Paulo, Sao Paulo, Brasil. Profesora titular, de la Universidad del Valle, Cali, Colombia. Correo electrónico: patricia.torres@correounivalle.edu.co

Resumen

La localización de almacenamientos temporales es una actividad fundamental en la gestión de residuos sólidos hospitalarios. La selección del sitio para la ubicación de estos almacenes no puede ser una tarea trivial, se deben contemplar múltiples factores, que van desde las normas asociadas hasta los requerimientos propios del generador. En este documento se propone una metodología de selección de esos depósitos internos, basándose en técnicas multicriterio (Analytic Hierarchy Process, AHP, y Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution, TOPSIS), que comparen las opiniones del grupo decisor para seleccionar la mejor alternativa de localización. Para un mejor entendimiento de la metodología empleada, se desarrolla un caso de estudio en un centro de salud de Santiago de Cali, Colombia. En este caso se puede observar, además de la implementación paso a paso de la metodología, la complementariedad de las dos técnicas usadas, que permite robustecer la toma de decisiones a partir de las relaciones que se forman por las opiniones de los involucrados entre los criterios principales de evaluación y las alternativas posibles de localización.

Palabras clave

AHP, localización de instalaciones, residuos sólidos hospitalarios, TOPSIS.

Abstract

The temporary storage location is a fundamental activity on the hospital solid waste management. The site selection for the location of these stores can not be a trivial task, many factors must be considered, ranging from the rules associated to the proper requirements of the generator. This paper proposes a methodology for selecting these domestic deposits, based on multicriteria techniques (Analytic Hierarchy Process, AHP, and Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution, TOPSIS), which compare the opinions of the group decider to select the best alternative of location. For a better understanding of the methodology, we develop a case study in a health center of Santiago de Cali, Colombia. In this case you can see, in addition to the step by step implementation of the methodology, the complementarity of the two techniques used, which strengthen the decision making from the relationships that are formed by the opinions of those involved among the main criteria of assessment and the possible alternatives of location.

Keywords

AHP, location of facilities, hospital solid waste, TOPSIS.

Resumo

A procura de local de armazenamento temporário é uma atividade fundamental na gestão de resíduos sólidos hospitalares. A escolha de um lugar para localização destes armazenamentos não pode ser tarefa trivial. É preciso contemplar múltiplos fatores que vão, desde as regras associadas até as exigências específicas do gerador. Neste documento propõe-se uma metodologia de escolha desses depósitos internos, com base em técnicas multicritério (*Analytic Hierarchy Process*, AHP, e *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*, TOPSIS), que comparem as opiniões do grupo decisor para escolher a melhor alternativa de localização. Para um entendimento melhor da metodologia empregada, desenvolve-se um caso de estudo em um posto de saúde de Santiago de Cali, Colômbia. Neste caso observou-se, além da implementação passo a passo da metodologia, a complementaridade das duas técnicas usadas que permite avigorar a tomada de decisões a partir das relações que se formam pelas opiniões dos envolvidos entre os critérios principais de avaliação e as alternativas possíveis de localização.

Palavras-chave

AHP, localização de instalações, resíduos sólidos hospitalares, TOPSIS.

1. Introducción

La Organización Mundial de la Salud (OMS) ha definido los *residuos sólidos hospitalarios* (RSH) como “cualquier tipo de residuo sólido que se genera en el diagnóstico, tratamiento o inmunización de seres humanos o animales” (Abd El-Salam 2010); entre el 75 y 90% son residuos sanitarios sin riesgo o comparables con los residuos sólidos domiciliarios (RSD); el restante se consideran peligrosos y pueden generar una variedad de riesgos (Ferreira y Teixeira, 2010). En los países en desarrollo, los RSH aún no han recibido la atención adecuada, especialmente cuando son eliminados, en muchos casos, junto con los RSD (Patwary *et al.*, 2011), lo que lleva a que su gestión sea un problema de salud pública y ambiental muy importante, que casi siempre se ve obstaculizada por el cambio tecnológico, las dificultades económicas y sociales, y la inadecuada capacitación del personal responsable del manejo y procesamiento de residuos (Manga *et al.*, 2011).

En Colombia, el Programa Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos Hospitalarios (GIRSH) se fundamenta en tres componentes principales: los instrumentos reglamentarios, el proceso permanente de divulgación y sensibilización, y el Manual de Procedimientos para la Gestión Integral de Residuos Hospitalarios y Similares (MPGIRH) (Minambiente y Minsalud, 2002). Este último se basa en dos grandes elementos: la gestión externa y la interna; la primera se refiere al conjunto de operaciones y actividades de la gestión de residuos, que por lo general se realiza por fuera del establecimiento del generador, como la recolección, el aprovechamiento, el tratamiento (que también puede ser hecha internamente) y la disposición final.

A su vez, la gestión interna consiste en la planeación e implementación articulada de todas y cada una de las actividades realizadas en la entidad generadora de RSH y similares, incluyendo las actividades de generación, separación en la fuente, desactivación, movimiento interno, *almacenamiento* y entrega de los residuos al prestador del servicio especial de aseo. El almacenamiento, como

componente de la gestión interna, es la acción del generador consistente en depositar segregada y temporalmente sus residuos. De acuerdo con el Decreto 2676 de 2000 (Ministerios del Medio Ambiente y de Salud), para este almacenamiento interno debe contarse como mínimo con dos sitios de uso exclusivo, uno intermedio y otro central.

Por las características intrínsecas y los requerimientos que se desprenden de las normas, situar los almacenamientos (intermedio y central) requeridos para depositar los RSH implicaría utilizar métodos que sirvan para localizar instalaciones no deseadas (*obnoxious location problem*), las cuales tienen efectos adversos sobre las personas o el ambiente (Melachrinoudis, 2011). En la literatura se plantean diferentes estrategias, algoritmos y metodologías que pretenden proporcionar soluciones para una adecuada localización de este tipo de instalaciones, algunas de las cuales exponen la necesidad de hacerlo mediante técnicas exactas que busquen la localización óptima, mientras que otras parten de escoger “lo mejor” dentro de “lo posible”, como es el caso del análisis multicriterio (Romero, 1996).

El análisis de decisión multicriterio (MCDA, por sus siglas en inglés) es un conjunto de métodos que ayudan en la toma de decisiones, utilizando las preferencias en los casos en los que existen criterios en conflicto. El objetivo es ayudar a escoger y ordenar por importancia diferentes alternativas de un conjunto finito, de acuerdo con dos o más criterios que tienen injerencia en la decisión final y que se han tenido en cuenta adecuadamente, lo que reduce la posibilidad de arrepentimiento posdecisión (Barfod, 2012).

Métodos como ELECTRE (Elimination et Choix Traduisant la Réalité), VIKOR (VIsekriterijumska Optimizacija i KOmpromisno Resenje), AHP (Analytic Hierarchy Process) y TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution), entre otros, intentan ayudar a un decisor a encontrar soluciones satisfactorias. En términos generales, los procedimientos que se utilizan en cada una de estas herramientas son similares y se basan en comparar entre sí las diferentes alternativas con base en cada criterio y después agregar esta información, considerando la fuerza de las evidencias a favor y en contra de la selección de una alternativa respecto a otra (García-Cascales, 2009). No es tan fácil, como pareciera definir cuál método tiene más sentido y por tanto cuál conduce a una mejor solución, sobre todo porque cada uno puede llegar a tener una base axiomática diferente. Estos métodos deben considerarse como procedimientos heurísticos que permiten, en la generalidad de los casos, obtener resultados razonables de problemas decisionales multicriterio de gran complejidad e importancia (Romero, 1996).

Estas técnicas han sido especialmente utilizadas para problemas ambientales, como la gestión de los recursos naturales, la evaluación de la contaminación ambiental y la localización de instalaciones. De la revisión hecha por Huang *et al.* (2011) sobre el uso de MCDA en problemas ambientales, respecto a la gestión de residuos, el AHP/ANP (Analytic Hierarchy Process/Analytic Network Process) es el método más usado para representar diferentes situaciones, y el TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) aún no ha sido usado para este tipo de problemas. En contraste, Behzadian *et al.* (2012) muestran cómo diferentes autores (Cheng *et al.*, 2003; Gumus, 2009 y Ekmekçioğlu, *et al.*, 2010) han utilizado el TOPSIS combinándolo con otras técnicas para la selección apropiada de sitios y métodos relacionados con la gestión de residuos.

El fundamento del AHP se basa en la idea de que la complejidad inherente a un problema de toma de decisión con criterios múltiples se puede resolver mediante la jerarquización de los problemas planteados (García-Cascales, 2009), mientras que el principio básico del TOPSIS es que la alternativa elegida debe tener la “distancia más corta” a la solución ideal positiva y la “distancia más larga” a la solución ideal negativa (Jahanshahloo *et al.*, 2006). La necesidad de encontrar en este procedimiento un vector que permita ponderar los criterios elegidos hace posible la fácil integración (complementariedad) de estas dos técnicas multicriterio.

En este documento se presenta la aplicación de la combinación de estos dos métodos para determinar la mejor ubicación posible de una instalación que presta el servicio de almacenamiento temporal en un centro de salud de la empresa social del Estado Red de Salud de Santiago de Cali, Colombia.

2. Sobre el centro de salud seleccionado

Las instalaciones del centro de salud ocupan un terreno de 3.371,63 m², distribuidos en dos construcciones (edificios). Tiene una zona destinada a parqueadero y varias zonas verdes. Para el estudio se tomó como base el edificio 1, en el cual se encuentra ubicado el laboratorio clínico, mientras que en el edificio 2 se encuentran las oficinas de administración y el programa de prevención física y salud mental. En el laboratorio clínico es donde se toman y se procesan muestras de diferentes fluidos corporales; allí es donde se genera la mayor cantidad de RSH. Los residuos generados son de cuatro tipos: biodegradables, reciclables, biosanitarios y cortopunzantes. Para este caso se tomarán en cuenta todos, incluidos los residuos biodegradables y reciclables, ya que por estar expuestos a un ambiente de alta peligrosidad viral y/o bacterial, deben ser tratados como peligrosos.

El proceso de recolección de residuos sólidos hospitalarios en el centro de salud consiste en operaciones simples, que van desde el *anudado* (cierre de bolsas) hasta la *desinfección y recubrimiento del carro manual recolector*, pasando por el movimiento de la bolsa, la limpieza de contenedores, etc. Estas tareas son influyentes al momento de la selección de un sitio propicio para la disposición de residuos en el centro de salud.

Para hacer efectiva la ruta de recolección interna, el encargado debe recorrer cada localización, recolectando de cada reservorio temporal los materiales desechados por el personal que labora en cada consultorio, oficina u espacio del edificio 1. En esta ruta se recorren 193 metros lineales en la hora y media que dura dicha acción, aproximadamente. Los materiales recolectados permanecen máximo tres días en el sitio de disposición, ya que la empresa que se encarga de la desactivación y/o incineración de los residuos los recoge los miércoles y sábados. Cabe anotar que el centro de salud no trabaja el domingo, por ello este día no se realiza la ruta sanitaria y el punto de almacenamiento final se encuentra desocupado.

3. Metodología

3.1. *Análisis de decisión multicriterio (MCDA)*

En la figura 1 se presentan las fases (en general) en las que se puede incurrir al utilizar cualquier método de decisión multicriterio. Esta figura muestra la importancia que le da el análisis de decisión a la estructuración del problema y a la evaluación de alternativas para seleccionar una opción. Las otras partes del proceso se vuelven importantes al momento de implementar la decisión y evaluar los resultados.

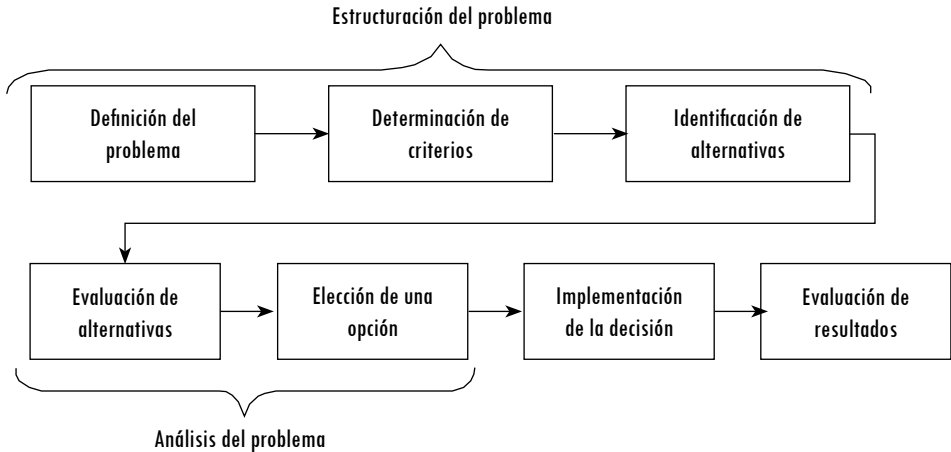
3.2. *Estructuración del problema*

Esta parte del proceso general de toma de decisiones comprende elementos fundamentales para poder realizar un mejor análisis del problema y el posterior uso de las herramientas definidas. Inicialmente se requiere definir el problema, pues así se puede observar mejor el objetivo, permitiendo determinar los diferentes criterios necesarios, que se convierten en las características más relevantes, y así comparar las alternativas identificadas como las posibles opciones que tiene el decisor para hacer efectiva la decisión (García-Cascales, 2009).

Para obtener una cantidad media en kilogramos de residuos generados se tomaron datos (pesando los recipientes) por 91 días por cada punto de acopio intermedio y por cada tipo de residuo. Los 19 puntos que componen el laborato-

rio generan alrededor de 50 kg/día de residuos, lo que lleva a pensar en un solo depósito, ya que el MPGIRH (2002) da esa posibilidad para los establecimientos que generan 65 kg o menos residuos por día.

Figura 1. Representación de las fases de un proceso de decisión multicriterio



Fuente: adaptado de Pardo (2011).

La definición de los criterios se hizo con los involucrados tanto en la gestión física de los residuos como en la toma de decisiones. Los operadores (3), el supervisor (1), el gerente administrativo (1) y el gerente general (1) definieron siete criterios, luego de varias reuniones y por medio del uso de varias herramientas colaborativas, como encuesta y entrevista. Estos criterios fueron obtenidos a partir del conocimiento y la iniciativa de los involucrados; no obedeció a una estructura ya dada.

3.3. Análisis del problema

Luego de estructurado el problema, el proceso de decisión multicriterio incluye evaluar las alternativas posibles y elegir la mejor, para lograrlo se aplicó TOPSIS, un método que afronta el dilema de trabajar con el ideal y el antiideal. El procedimiento puede ser expresado en una serie de pasos representados en la tabla 1.

Tabla 1. Procedimiento TOPSIS

Paso	Definición	Ecuación	Observaciones
Construir la matriz de decisión	Se refiere a m alternativas A_j , las cuales son evaluadas en función de n criterios, C_j .	$\begin{matrix} W_1 & \dots & W_j & \dots & W_n \\ C_1 & \dots & C_j & \dots & C_n \end{matrix}$ $\begin{matrix} A_1 & \dots & x_{1j} & \dots & x_{1n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ A_m & \dots & x_{mj} & \dots & x_{mn} \end{matrix}$	Donde w_j es el vector de pesos asociado con C_j . Puede hallarse de diferentes formas: por medio de una escala previamente establecida, por asignación directa del decisor y por asignación directa mediante técnicas de comparación de criterios.
Normalizar la matriz de decisión	Se evalúa la matriz construida. Los valores obtenidos en las relaciones de alternativas con criterios no son de igual valor para todos los criterios.	$\bar{n}_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^m (x_{ij})^2}}$ $j = 1, \dots, n;$ $i = 1, \dots, m$	Donde n_{ij} representa la alternativa normalizada y x_{ij} es el valor de la comparación anteriormente obtenido en la matriz original.
Construir la matriz de decisión normalizada ponderada	v_j representa el valor normalizado ponderado de la matriz de decisión normalizada ponderada.	$\bar{v}_{ij} = w_j \cdot \bar{n}_{ij}$ $j = 1, \dots, n;$ $i = 1, \dots, m$	
Determinar la solución ideal positiva y la solución ideal negativa	Es el conjunto de valores ideal positivo y el conjunto de valores ideal negativo.	$\bar{A}^+ = \left\{ \bar{v}_1^+, \dots, \bar{v}_n^+ \right\}$ $= \left\{ \begin{matrix} (\max_i \bar{v}_{ij}, j \in J) \\ (\min_i \bar{v}_{ij}, j \in J^c) \end{matrix} \right\}$ $\bar{A}^- = \left\{ \bar{v}_1^-, \dots, \bar{v}_n^- \right\}$ $= \left\{ \begin{matrix} (\max_i \bar{v}_{ij}, j \in J) \\ (\min_i \bar{v}_{ij}, j \in J^c) \end{matrix} \right\}$	Donde J está asociada con los criterios de beneficio y J^c está asociada con los criterios de costos.

Paso	Definición	Ecuación	Observaciones
<p>Calcular las medidas de distancia</p>	<p>Se encuentra qué tan lejos está cada alternativa en cada criterio de la “mejor” opción e igualmente qué tan lejos se encuentran de la “peor” opción</p>	$d_i^+ = \frac{1}{2} \left(\sum_{j=1}^n (v_{ij} - \bar{v}_j^+)^2 + \sum_{j=1}^m (v_{ij} - \bar{v}_j^-)^2 \right)^{\frac{1}{2}}$	
<p>Calcular la proximidad relativa a la solución ideal y ordenar las preferencias</p>	<p>Se calcula la proximidad relativa Ri a la solución ideal</p>	$\bar{R}_i = \frac{\bar{d}_i^-}{\bar{d}_i^+ + \bar{d}_i^-}, i = 1, \dots, m$ <p>Si $\bar{R}_i = 1 \rightarrow A_i = \bar{A}^+$ Si $\bar{R}_i = 0 \rightarrow A_i = \bar{A}^-$</p>	<p>Para la ordenación de las preferencias, cuanto más próximo a 1 sea el valor de Ri, mayor es la prioridad de la alternativa i-ésima correspondiente.</p>

Fuente: adaptado de Jahanshahloo et al., 2006.

Entre los beneficios de este procedimiento se incluye el hecho de relacionar los pesos de cada criterio con las alternativas que se tienen, y las ventajas y desventajas que cada una de ellas puede ofrecerles al sistema analizado o problema formulado.

Como se establece en el primer paso (construir la matriz de decisión), el vector W_j puede hallarse de diferentes formas. En este caso es utilizada una de las técnicas de comparación de criterios, el proceso analítico jerárquico (AHP por sus siglas en inglés), que se fundamenta en el hecho de permitir dar valores numéricos a los juicios dados por las personas, logrando medir cómo contribuye cada elemento de la jerarquía al nivel inmediatamente superior del cual se desprende (Ávila, 2000). El método es usado tanto para seleccionar alternativas como para ponderar (*ranking*) los criterios, para que su peso sea usado en otro sistema de decisión. Este es el caso del presente documento.

4. Resultados y discusión

4.1. Definición del problema

El problema es la ubicación de un depósito interno que acopie todos los RSH por el tiempo que deben permanecer (tres días máximo) antes de ser recogidos por la empresa que realiza el tratamiento y la desactivación de estos.

4.2. Determinación de criterios

Los siete criterios definidos por el grupo de trabajo fueron:

- *Distancia de la última estación al punto de almacenamiento (C1)*: se define desde la necesidad de la lejanía del punto de almacenamiento respecto al edificio. La ruta sanitaria escoge “la mejor última estación” para luego desplazarse al sitio de almacenamiento.
- *Facilidad de acceso al punto (C2)*: se refiere a la facilidad que tiene el operario de acceder al punto de almacenamiento, dado que la ruta sanitaria se hace apoyada por un carro manual de recolección, por lo cual puede presentar dificultades tanto en el movimiento como en la facilidad de entrada al sitio propuesto.
- *Flujo de personas (C3)*: tiene en cuenta la cantidad de personas que transitan en las zonas aledañas al sitio de almacenamiento. Se debe considerar que entre menos personas pasen por este lugar, menor será la exposición.
- *Nivel de aislamiento (C4)*: el lugar de almacenamiento debe encontrarse en un lugar con un alto nivel de aislamiento, por ende su cerramiento debe darse por paredes y no por enmallado, donde sea posible.

- *Distancia a la puerta de embarque (C5)*: para completar el ciclo integral de residuos hospitalarios se requiere que los residuos sean llevados desde el punto de almacenamiento hasta a la puerta de acceso para ser dispuestos en el carro transportador de la entidad encargada de la gestión externa.
- *Distancia del punto de lavado al sitio de almacenamiento (C6)*: es importante considerar la distancia existente entre el sitio de almacenamiento y el punto de lavado de los carros manuales, ya que entre menor sea la distancia, menor será la exposición para pacientes y empleados del centro.
- *Adecuaciones necesarias (C7)*: en general, cuando se planea construir un punto de almacenamiento de residuos se deben tener algunas consideraciones para la adecuación del lugar (piso, paredes y techo, principalmente).

Como cada criterio debe ser medido según sus características, se definió para los criterios C1, C5 y C6 su medición con la ecuación de las distancias rectilíneas; para C2 y C4 se utilizó una combinación de factores cuantitativos (las propiedades del encerramiento) y cualitativos (la dificultad de acceso); C3 se determinó por el número de personas que pasan en los periodos analizados y, por último, para C7 se utilizó la necesidad de presupuesto económico para realizar la adecuación requerida.

4.3. Identificación de alternativas

Las alternativas para el punto de almacenamiento de residuos peligrosos fueron identificadas por el juicio de los involucrados en el problema en cuestión. En la figura 2 se pueden observar las alternativas P1, P2, P3 y P4, identificadas como posibles sitios donde podría estar ubicado el almacenamiento temporal. Este plano tiene una escala de 1/125, y en él se puede observar, además de los puntos posibles (en otro tono diferente), la vista de planta del edificio, donde se ven los 19 puntos de recolección, el punto de lavado de los recipientes y la puerta de embarque (salida).

Todas las alternativas son viables y pueden ser comparables, esto es fundamental para no excluir algún sitio antes de ser comparado.

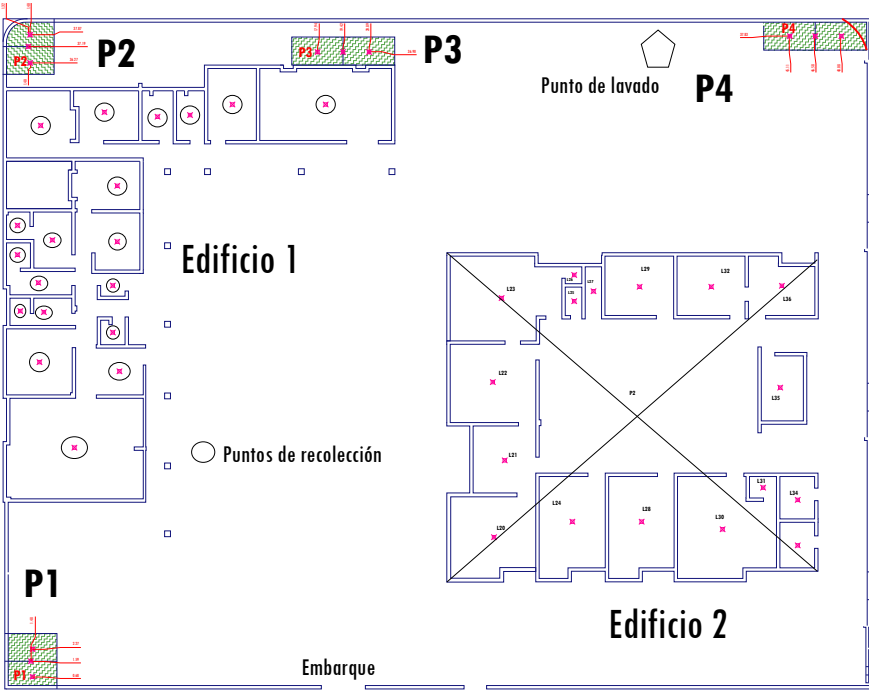
4.4. Evaluación de alternativas y elección de la mejor opción

4.4.1. Paso 1. Construcción de la matriz de decisión

Para este caso se recurrió al AHP; basándose en las opiniones de los involucrados, se realizaron las comparaciones pareadas de los diferentes criterios. La tabla 2

consigna la importancia que tiene para el grupo decisor un criterio frente a otro, para ello se utilizó la escala tradicional (1 a 9) propuesta por el método.

Figura 2. Plano de las áreas de servicio y las alternativas posibles de ubicación del almacenamiento



Fuente: presentación propia de los autores.

Tabla 2. Matriz de decisión. Comparación de criterios entre sí

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
C1	1	3	1/3	1/3	3	5	3
C2	1/3	1	1/3	1/4	1/3	1	1/2
C3	3	3	1	1/2	3	4	3
C4	3	4	2	1	3	3	1
C5	1/3	3	1/3	1/3	1	3	1
C6	1/5	1	1/4	1/3	1/3	1	1/3
C7	1/3	2	1/3	1	1	3	1

Fuente: presentación propia de los autores.

Un ejemplo de interpretación de los resultados de la tabla 2 es que para los decisores la *distancia de la última estación al punto de almacenamiento* (C1) es 5 veces más importante que la *distancia del punto de lavado al sitio de almacenamiento* (C6); o que este mismo criterio (C1) es 1/3 veces más importante frente al *del flujo de personas* (C3). Después de realizar el álgebra matricial requerida por el método para la satisfacción de la consistencia de las opiniones, se obtuvo el vector que relaciona los criterios (C_j) y los pesos (W_j) (parte superior de la tabla 3); se observa así que los criterios 4 (*nivel de aislamiento*) y 3 (*flujo de personas*) son los más importantes por su peso asociado, y a su vez C2 (*facilidad de acceso al punto*) y C6 (*distancia del punto de lavado al sitio de almacenamiento*), respectivamente, son los menos importantes.

La matriz completa de decisión (tabla 3) muestra cada valor (x_{ij}) que asocia las alternativas o puntos posibles (P) de ubicación con los criterios utilizados; estos valores fueron determinados según la forma establecida para cada criterio.

Tabla 3. Matriz de decisión. Resultado de comparación de criterios y alternativas

W	17,86%	5,18%	24,67%	26,77%	9,62%	4,64%	11,27%
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
P1	5	3	5	5	9	3	7
P2	2	7	9	9	3	5	2
P3	1	5	7	7	4	7	5
P4	9	5	3	5	2	9	7

Fuente: presentación propia de los autores.

La interpretación de la tabla indica, por ejemplo, que en el criterio C4 la mejor alternativa de ubicación es el sitio P2 (con el mayor puntaje), pero esta alternativa es la peor en el criterio C7. De igual forma sucede para cada punto de ubicación, donde para unos criterios ellos son “buenos” y para otros son “malos”.

4.4.2. Paso 2. Normalización de la matriz de decisión

Existe la necesidad de normalizar los valores, porque no es lo mismo que la alternativa 1 obtenga un 5 en el criterio 3 y un 5 en el criterio 4. En la tabla 4 se pueden observar todos los valores obtenidos y las diferencias al normalizar.

4.4.3. Paso 3. Construir la matriz de decisión normalizada ponderada

Se obtuvieron los valores de influencia de cada peso en cada criterio y en cada alternativa. Estos se pueden observar en la tabla 5.

Tabla 4. Matriz normalizada

	W	17,86%	5,18%	24,67%	26,77%	9,62%	4,64%	11,27%
		C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
n1	P1	0,47	0,29	0,39	0,37	0,86	0,23	0,62
n2	P2	0,19	0,67	0,70	0,67	0,29	0,39	0,18
n3	P3	0,09	0,48	0,55	0,52	0,38	0,55	0,44
n4	P4	0,85	0,48	0,23	0,37	0,19	0,70	0,62

Fuente: presentación propia de los autores.

Tabla 5. Matriz normalizada ponderada

		C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
n1	P1	0,08	0,05	0,07	0,07	0,15	0,04	0,11
n2	P2	0,03	0,12	0,13	0,12	0,05	0,07	0,03
n3	P3	0,02	0,09	0,10	0,09	0,07	0,10	0,08
n4	P4	0,15	0,09	0,04	0,07	0,03	0,13	0,11

Fuente: presentación propia de los autores.

4.4.4. Paso 4. Determinar la solución ideal positiva y la solución ideal negativa

Se asume como solución ideal positiva el máximo valor y como solución ideal negativa el mínimo valor que ha tomado la variable x_{ij} (tabla 6).

Tabla 6. Soluciones positivas y negativas para cada criterio

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
A⁺	0,15	0,12	0,13	0,12	0,15	0,13	0,11
A⁻	0,02	0,05	0,04	0,07	0,03	0,04	0,03

Fuente: presentación propia de los autores.

4.4.5. Paso 5. Cálculo de las medidas de distancia

La distancia de cada alternativa a la solución ideal positiva y a la solución ideal negativa se puede apreciar en la tabla 7.

Tabla 7. Medidas de distancia a la solución ideal

d+	P1	0,15		d-	P1	0,16
	P2	0,18			P2	0,13
	P3	0,17			P3	0,11
	P4	0,16			P4	0,18
	(a)				(b)	

Fuente: presentación propia de los autores.

4.4.6. Paso 6. Cálculo de proximidad relativa a la solución ideal y ordenación de preferencias

El resultado final se muestra en la tabla 8, donde se indica que la mejor alternativa es el sitio 4 seguido del sitio 1; en la figura 3 se aprecia mejor su ubicación física (sitio resaltado).

Tabla 8. Proximidad relativa a la solución ideal

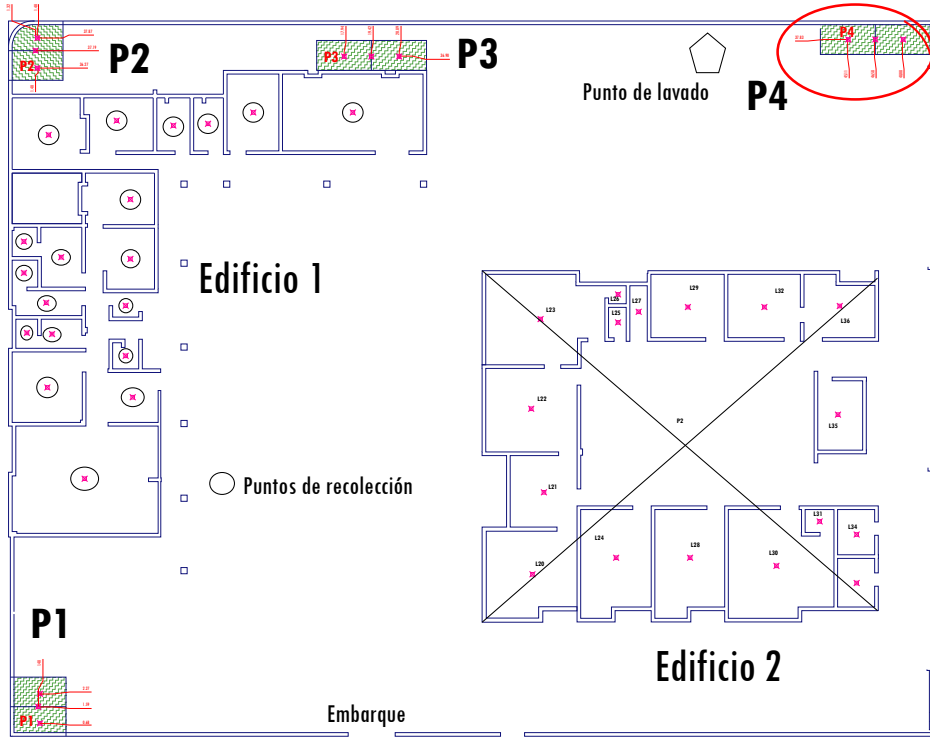
	R_i	Ranking
P1	0,519	2
P2	0,407	3
P3	0,382	4
P4	0,533	1

Fuente: presentación propia de los autores.

Como se observa, el uso de las herramientas desarrolladas presentó un alto potencial de aplicabilidad para la localización de almacenes temporales de RSH. El uso del análisis multicriterio y en especial de las técnicas AHP y TOPSIS han permitido robustecer la toma de decisiones, involucrando las percepciones y opiniones de los diferentes involucrados en el sistema objeto de estudio (Romero, 1996).

Las dos técnicas se complementan plenamente, ya que la mayor desventaja del TOPSIS es la necesidad de la normalización para problemas multidimensionales y esto puede ser suplido por medio del vector característico del AHP. El desarrollo de la técnica no implica un gran tiempo computacional, por el contrario, una de sus bondades es que es llevada a cabo en una hoja electrónica como un método sencillo (Pires *et al.*, 2011).

Figura 3. Plano final de la ubicación de la mejor opción para almacenamiento RSH



Fuente: Fuente: presentación propia de los autores.

Una evolución normal, que será tema de futuras investigaciones y aplicaciones, es la incorporación de la incertidumbre en las diferentes opiniones dadas. Como se observa en la literatura, existe la necesidad de tener en cuenta la ambigüedad de las opiniones de los involucrados en la toma de decisiones. Se puede decir que las variables lingüísticas hacen de la toma de decisión un proceso más realista, ya que así se pueden integrar elementos de incertidumbre que definitivamente hacen parte de esas decisiones. Para ello, tanto el AHP como el TOPSIS usan la lógica difusa haciendo la aplicación más confiable, como se puede observar en Önüt y Soner (2008), Gumus (2009), entre otros.

5. Conclusiones

La gestión interna de cualquier centro de salud debe contemplar la ubicación de los almacenamientos temporales necesarios para la disposición de residuos

sólidos hospitalarios durante el periodo que se mantengan en la institución generadora. Estos sitios no pueden ser ubicados de manera arbitraria y sin seguir un procedimiento robusto de selección. En el caso de estos centros de servicios no deseados (puntos de almacenamiento de RSH), por su complejidad, es fundamental relacionar métodos que involucren tantos factores cuantitativos y cualitativos como se pueda, con el fin de enfrentar la complejidad que se forma por los múltiples atributos del sistema.

Como se puede observar, ser la alternativa más importante en el criterio más importante no implica que deba ser seleccionada directamente como la mejor para todo el sistema. La alternativa P2 fue la mejor calificada en el criterio de mayor ponderación (C4: nivel de aislamiento) y no por esto debía ser seleccionada. En el caso contrario, la alternativa seleccionada como la mejor obtiene un puntaje muy bajo en uno de los criterios considerados como superiores (C3: flujo de personas), lo que implicaría que si se toma la decisión solo desde este criterio, la alternativa P4 no hubiese sido seleccionada. Ambos casos sirven para validar la necesidad de involucrar múltiples criterios en la toma de decisión más acertada.

Para futuras investigaciones es necesario seguir involucrando elementos sobre la localización de instalaciones que puedan generar problemas a la salud humana y/o a su estilo de vida. Estos modelos deben ir acompañados por los criterios habituales e involucrar situaciones específicas, como maximización de la cobertura del servicio, minimización de la cobertura del daño y minimización de los costos de compensación a una población por la afectación ocasionada.

Referencias

- ABD EL-SALAM, M. M. Hospital waste management in El-Beheira Governorate, Egypt. *Journal of Environmental Management*. 2010, vol. 91, núm. 3, pp. 618-629.
- ÁVILA, Mogollón Ruth Maritza. El AHP (Proceso Analítico Jerárquico) y su aplicación para determinar los usos de las tierras: El caso Brasil. Santiago de Chile: Proyecto regional "Información sobre tierras y aguas para un desarrollo agrícola sostenible". FAO. 2000. <www.rlc.fao.org/proyecto/gcp/rla/126/jpn/documents/Informes%20Técnicos/2_AHP.pdf
- BARFOD, M. B. An MCDA approach for the selection of bike projects based on structuring and appraising activities. *European Journal of Operational Research*. 2012, vol. 218, núm. 3, pp. 810-818.
- BEHZADIAN, M.; KHANMOHAMMADI OTAGHSARA, S.; YAZDANI, M.; et al. A state-of-the-art survey of TOPSIS applications. *Expert Systems with Applications*. 2012, vol. 39, núm. 17, pp. 13051-13069.

- CHENG, S.; CHAN, C. W. y HUANG, G. H. An integrated multi-criteria decision analysis and inexact mixed integer linear programming approach for solid waste management. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2003, vol. 16, pp. 543-554.
- COLOMBIA, DECRETO 2676, 2000. *Reglamento de la gestión integral de los residuos hospitalarios y similares*. Ministerio del Medio Ambiente y Ministerio de Salud.
- EKMEKÇIOĞLU, M.; KAYA, T. y KAHRAMAN, C. Fuzzy multicriteria disposal method and site selection for municipal solid waste. *Waste Management*. 2010, vol. 30, pp. 1729-1736.
- FERREIRA, V. y TEIXEIRA, M. R. Healthcare waste management practices and risk perceptions: Findings from hospitals in the Algarve region, Portugal. *Waste Management*. 2010, vol. 30, núm. 12, pp. 2657-2663.
- GARCÍA-CASCALES, M. *Métodos para la comparación de alternativas mediante un Sistema de Ayuda a la Decisión (S.A.D.) y "Soft Computing"*. Tesis Doctoral, Departamento de Electrónica, Tecnología de Computadoras y Proyectos. Universidad Politécnica de Cartagena. Cartagena, España 2009. <http://repositorio.bib.upct.es/dspace/bitstream/10317/1022/1/Msgc.pdf>.
- GUMUS, A. T. Evaluation of hazardous waste transportation firms by using a two step fuzzy-AHP and TOPSIS methodology. *Expert Systems with Applications*. 2009, vol. 36, núm. 2, Part 2, pp. 4067-4074.
- HUANG, I. B.; KEISLER, J. y LINKOV, I. Multi-criteria decision analysis in environmental sciences: Ten years of applications and trends. *Science of The Total Environment*. 2011, vol. 409, núm. 19, pp. 3578-3594.
- JAHANSHALOO, G. R.; LOTFI, F. H. y IZADIKHAH, M. Extension of the TOPSIS method for decision-making problems with fuzzy data. *Applied Mathematics and Computation*. 2006, vol. 181, núm. 2, pp. 1544-1551.
- MANGA, V. E.; FORTON, O. T.; MOFOR, et al. Health care waste management in Cameroon: A case study from the Southwestern Region. *Resources, Conservation and Recycling*. 2011, vol. 57, núm. 0, pp. 108-116.
- MELACHRINOUDIS, E. The Location of Undesirable Facilities. En: Eiselt, H. A. & Marianov, V. (eds.) *Foundations of Location Analysis*. New York: International Series in Operations Research & Management Science, Springer, 2011.
- ÖNÜT, S. y SONER, S. Transshipment site selection using the AHP and TOPSIS approaches under fuzzy environment. *Waste Management*. 2008, vol. 28, núm. 9, pp. 1552-1559.
- PARDO, M. *Propuesta de una metodología para la ubicación de depósitos intermedios y/o finales de residuos no deseados generados por centros de atención hospitalarios*. Proyecto de grado. Universidad del Valle, Cali, Colombia, 2011.
- PATWARY, M. A., O'HARE, W. T. y SARKER, M. H. Assessment of occupational and environmental safety associated with medical waste disposal in developing countries: A qualitative approach. *Safety Science*. 2011, vol. 49, núm. 8-9, pp. 1200-1207.

- PIRES, A.; CHANG N. B. y MARTINHO, G. An AHP-based fuzzy interval TOPSIS assessment for sustainable expansion of the solid waste management system in Setúbal Peninsula, Portugal. *Resources, Conservation and Recycling*. 2011, vol. 56, núm. 1, pp. 7-21.
- MINAMBIENTE y MINSALUD. *Resolución número 1164 de 2002. Manual de Procedimientos para la Gestión Integral de Residuos Hospitalarios y Similares en Colombia*. MPGIRH. Bogotá: Ministerio del Medio Ambiente y Ministerio de Salud.
- ROMERO, C. *Análisis de las Decisiones Multicriterio*. Madrid: ISDEFE, 1996.

