

REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica.

APLICACIÓN DEL PROCESO DE ANÁLISIS JERÁRQUICO PARA LA UBICACIÓN DE SITIOS DE DISPOSICIÓN FINAL DE RESIDUOS DE LA CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN: CASO ESTUDIO CIUDAD DE MÉXICO

Eduardo Hernández Malva¹
Juan Pablo Moreno Ordaz¹
*Constantino Gutiérrez Palacios¹

APPLICATION OF THE ANALYTIC HIERARCHY PROCESS FOR THE LOCATION OF CONSTRUCTION AND DEMOLITION WASTES DISPOSAL SITES: CASE STUDY OF MEXICO CITY

Recibido el 8 de septiembre de 2017; Aceptado el 14 de marzo de 2018

Abstract

The search for final disposal sites (FDS) for Construction and Demolition Waste (C&DW) in Mexico City has been complicated by the scarcity of this type of infrastructure. In order to define a methodology for its location, this work focuses on the evaluation of 12 sites in Mexico City, located at South and East of the city. Some of these sites are located within Protected Natural Areas (PNA), and an evaluation was necessary to compare them with those located outside these areas. The Analytical Hierarchy Process technique was used for the classification of the lands, which was based on variables chosen by an interdisciplinary panel of experts, divided into three criteria: environmental, technical and socioeconomic. The analysis resulted in four feasible sites: one is located in the Tlalpan delegation and the rest in the Tláhuac delegation. Subsequent to the definition of the best qualified lands, a second analysis was carried out, based on additional characteristics of the sites, such as the proximity to the generation sources of C&DW, ease of access, their area, among others. The best evaluated site was in Tláhuac delegation, next to the road Eje 10 Sur to Santa Catarina, near the limits with the State of Mexico, and it has an area of 213 ha.

Keywords: *analytical hierarchy process, construction and demolition waste, final disposal site.*

¹ División de Ingeniería Civil y Geomática, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), México.

*Autor correspondiente: División de Ingeniería Civil y Geomática, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. Av. Universidad No. 3000, Ciudad Universitaria, México CDMX. CP 04510. México. Email: cgping@yahoo.com

Resumen

A causa de la gran superficie ocupada por zonas urbanas y de reserva natural, en la Ciudad de México (CDMX) se ha dificultado la búsqueda de áreas disponibles para la ubicación de sitios de disposición final (SDF) de Residuos de la Construcción y Demolición. De esta manera, el objetivo de este trabajo es definir una metodología general para la ubicación de SDF de RCyD, y aplicarla a la CDMX como caso de estudio a partir de la evaluación de 12 predios localizados al sur y oriente de la ciudad. Algunos de estos sitios se encuentran dentro de Áreas Naturales Protegidas (ANP), y fue necesario realizar una evaluación para compararlos con las de los que se localizan fuera de estas áreas. Para la calificación de los predios, se utilizó la técnica de Proceso de Análisis Jerárquico (AHP, por sus siglas en inglés), la cual se basó en variables elegidas por un panel de expertos interdisciplinario, dividiéndose en tres criterios: ambientales, técnicos y socioeconómicos. El análisis dio como resultado cuatro sitios factibles: uno se ubica en la delegación Tlalpan y el resto en la delegación Tláhuac. Posterior a la definición de los predios mejor calificados, se realizó un segundo análisis, con base en características adicionales de los sitios, como la cercanía con las fuentes de generación de RCyD, la facilidad de acceso, su área, entre otras. El sitio mejor evaluado se encuentra en la delegación Tláhuac, junto al Eje 10 Sur Carretera a Santa Catarina, cerca de los límites con el Estado de México, y cuenta con una superficie de 213 ha.

Palabras clave: proceso de análisis jerárquico, residuos de la construcción y demolición, sitio de disposición final.

Introducción

La industria de la construcción es un sector fundamental para la economía mundial, debido a que provee la base en la que otros sectores económicos pueden desarrollarse, por medio de la construcción de instalaciones necesarias para la producción y distribución de bienes y servicios (Habitat, 1996). No obstante, como mencionan Nagapan *et al.* (2011), el rápido crecimiento de esta actividad ha incrementado los problemas relacionados con los RCyD.

En México, la generación promedio anual de RCyD es de 6.11 millones de toneladas, representando el 17.5% de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) (SEMARNAT, 2012); sin embargo, la producción de estos residuos ha aumentado considerablemente durante las últimas décadas, ocasionando un problema ambiental a consecuencia de su vertido incontrolado (Romero, 2007).

En materia de regulación, la CDMX y el Estado de México son las únicas entidades que cuentan con normas destinadas a la reglamentación del manejo de los RCyD: la NADF-007-RNAT-2013 y la NTEA-011-SMA-RS-2008, respectivamente, siendo la norma mexiquense la única que estipula un conjunto de restricciones para la ubicación de sitios de disposición final de estos residuos (SEDEMA, 2013; SMA, 2008).

Dado que en el resto del país no existen normas que regulen la ubicación de SDF de RCyD en México, cerca del 50% de estos residuos son dispuestos en suelos de conservación, en la vía pública o en otros sitios clandestinos; mientras que el 3% es reciclado, el 20% es enviado a sitios

de disposición final autorizados y el 13% se dispone en rellenos sanitarios para RSU, reduciendo la vida útil de estos sitios por las características y el volumen de estos residuos (CMIC, 2013).

En el 2010, la Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial de la CDMX (PAOT) publicó un estudio de zonas usadas como tiraderos clandestinos de RCyD en la ciudad. Con base en denuncias recibidas por delegaciones e investigaciones realizadas por la PAOT, se contabilizaron 168 sitios clandestinos dentro de la capital del país, afectando a cuerpos de agua, el aire, el suelo, la flora, la fauna y el sistema de drenaje del área (PAOT, 2010).

Con el fin de evitar cualquier daño al ambiente y a la salud humana, es necesario contar con una técnica o metodología que permita ubicar SDF de RCyD que causen el menor impacto negativo posible. SEDESOL (1996) recomienda un proceso que consiste en cuatro etapas:

- Identificación y evaluación de zonas de estudio.
- Identificación de sitios potenciales.
- Evaluación y cribado de los sitios potenciales.
- Selección final del sitio.

El objetivo de este trabajo es evaluar la factibilidad de sitios potenciales para disponer RCyD, empleando el Proceso de Análisis Jerárquico (AHP, por sus siglas en inglés) y aplicando la metodología desarrollada en la Ciudad de México. Satty (1980), el creador de la técnica, indica que el AHP consiste en dividir un problema o una situación compleja en sus partes o variables que la componen, realizando un arreglo en orden jerárquico, para después asignarles valores numéricos a juicios subjetivos sobre la importancia relativa de cada parte o variable, con el fin de sintetizarlos para determinar cuáles tienen la mayor prioridad. Al dividir la situación o el problema en partes o variables, la persona que evalúa puede centrarse en conjuntos más pequeños de decisiones.

En la siguiente sección se expone la aplicación de la metodología para la evaluación de sitios. No obstante, las primeras dos etapas para la ubicación de SDF no forman parte de los alcances de este trabajo, por lo que en la sección de Metodología se empezará con el conjunto de sitios potenciales. Adicionalmente, como mecanismo de control, tres de estos predios se encuentran dentro de un ANP, con el fin de observar las diferencias en las evaluaciones que se obtengan con aquellos lugares que no formen parte de estas áreas de reserva.

Por último, es importante señalar que esta metodología es una herramienta útil que pueden emplear tanto el gobierno como las constructoras. Para los primeros, el uso de esta técnica facilitaría la definición de diversos sitios que reciban los residuos de obras autorizadas; en el otro caso, permitiría determinar uno o varios sitios, previamente autorizados por el gobierno, que reciban los residuos generados en los proyectos de la constructora.

Metodología

Inicialmente, se definieron los SDF de RCyD potenciales dentro de la CDMX, los cuales se ubican principalmente al sur y oriente de la entidad. En la Tabla 1 se muestra el número y el nombre que se asignó a cada sitio potencial, mientras que en la Figura 1 se muestra un croquis de la ubicación del conjunto de sitios.

Tabla 1. Sitio potenciales para la disposición de RCyD en la CDMX

Número	Nombre del sitio
P ₁	Ajusco
P ₂	Cerro de la Estrella
P ₃	Milpa Alta 2
P ₄	Tláhuac 1
P ₅	Tláhuac 2
P ₆	Tlalpan 1
P ₇	Tlalpan 2
P ₈	Xico 0
P ₉	Xico 1
P ₁₀	Xico 2
P ₁₁	Xico 2'
P ₁₂	Xico 3

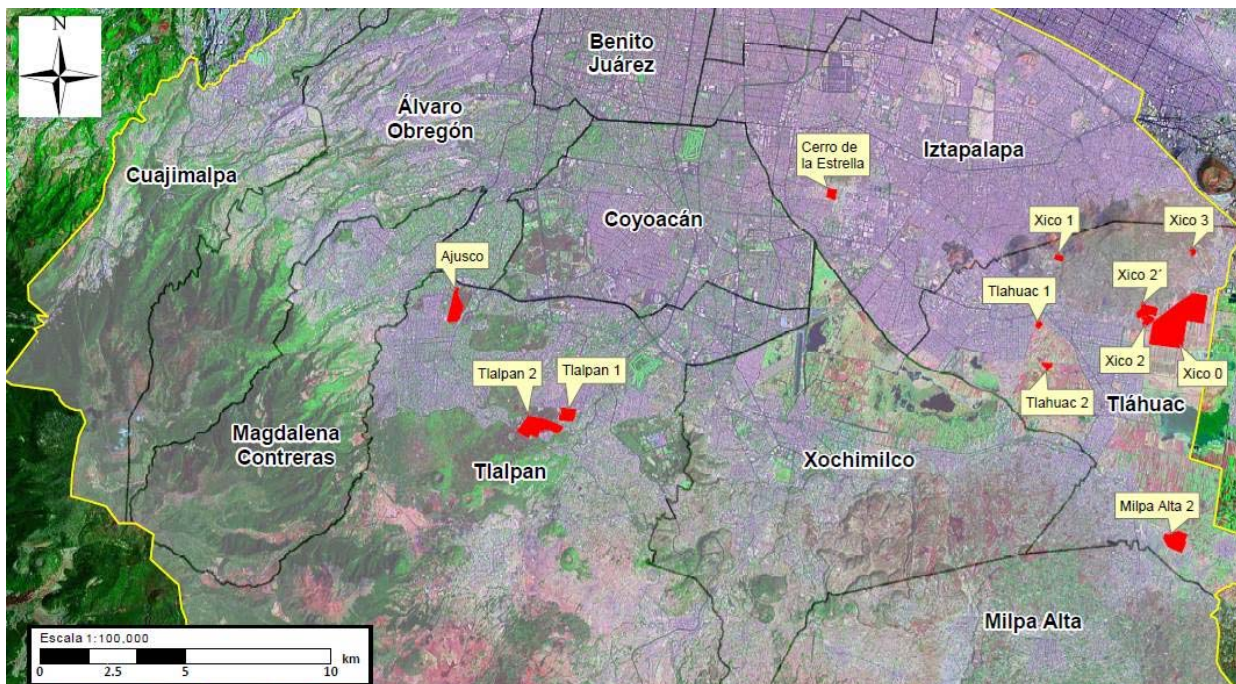


Figura 1. Ubicación del conjunto de sitios potenciales

Para la evaluación de SDF de RCyD, se consideraron tres criterios generales: ambientales, técnicos y socioeconómicos. Los criterios ambientales se relacionan usualmente con la normatividad y la legislación existente; en este sentido, constituyen el primer paso o grupo de restricciones de observancia obligatoria. Por otra parte, los criterios técnicos constituyen un paso necesario y consecutivo a los criterios ambientales, debido a que están directamente relacionados con el funcionamiento y operación de la infraestructura, y no sobre la afectación ambiental. Por último, los criterios socioeconómicos se relacionan con la afectación al ser humano y con los costos que ocasiona el emplazamiento de la infraestructura.

Con base en la clasificación anterior, se definieron las variables que constituyen a cada criterio. Cabe resaltar que se recomienda realizar este paso con ayuda de un panel de expertos interdisciplinario. Para la elaboración de este trabajo, se consultaron especialistas en los campos de Geografía, Ingeniería Ambiental, Hidrología, Mecánica de Suelos, Topografía y Geología. De esta forma, las Tablas 2, 3 y 4 muestran las variables de los criterios ambiental, técnico y socioeconómico.

Tabla 2. Variables del criterio ambiental

CG _i	Criterio ambiental
i ₁	Afectación de la capa vegetal existente
i ₂	Áreas de importancia natural
i ₃	Permeabilidad del suelo y afectación de agua subterránea
i ₄	Afectación de la calidad de agua superficial
i ₅	Afectación a fauna presente en el sitio
i ₆	Afectación a la calidad de vida por contaminación de aire y ruido en las cercanías

Tabla 3. Variables del criterio socioeconómico

CG _j	Criterio socioeconómico
j ₁	Factibilidad de adquisición
j ₂	Aceptación comunal
j ₃	Uso de suelo
j ₄	Cercanías o colindancias con zonas poblacionales
j ₅	Costo del terreno
j ₆	Presencia de grupos u organizaciones en las cercanías del emplazamiento de la obra
j ₇	Oferta de empleo derivado de la ejecución del proyecto

Tabla 4. Variables del criterio técnico

CG _k	Criterio técnico
k ₁	Área del predio
k ₂	Cercanías a zonas de producción de RCyD
k ₃	Distancia, tipo, ancho y longitud de vialidades de acceso
k ₄	Topografía del terreno
k ₅	Presencia de infraestructura hidráulica (canales, acueductos, tanques o cajas de almacenamiento, pozos de visita, plantas de tratamiento, etc.)
k ₆	Capacidad de carga del suelo
k ₇	Cuencas de captación alrededor del sitio
k ₈	Presencia de infraestructura urbana: electricidad, telefonía y fibra óptica, líneas de telégrafos, tuberías de Pemex y/o gas natural, etc.
k ₉	Flujo vehicular
k ₁₀	Problemas manifiestos de encharcamientos y/o inundaciones
k ₁₁	Presencia de fallas y fracturas en el predio y sus alrededores
k ₁₂	Deformaciones en el terreno

Posteriormente, se realizó la comparación por pares de los criterios generales, las variables y las alternativas, con el propósito de establecer las prioridades de cada uno de ellos. Este paso se llevó a cabo a través de una matriz de comparaciones, usando elementos de álgebra matricial.

Para la comparación de los criterios generales, se asignaron los valores a la matriz. Estos valores se eligieron con base en las escalas de Saaty (1980), las cuales dependen de la preferencia o la importancia que exista entre los criterios (ver Tabla 5). Los valores 2, 4, 6 y 8 se utilizan cuando no se puede definir con claridad la preferencia entre los factores.

Tabla 5. Escalas de Saaty

Intensidad	Definición	Explicación
1	De igual importancia	Dos actividades contribuyen de igual forma al objetivo
3	Moderada importancia	La experiencia y el juicio favorecen levemente a una actividad sobre la otra
5	Importancia fuerte	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente una actividad sobre la otra
7	Muy fuerte o demostrada	Una actividad es mucho más favorecida que la otra; su predominancia se demostró en la práctica
9	Extrema	La evidencia que favorece una actividad sobre la otra, es absoluta y totalmente clara
2, 4, 6, 8	Valores intermedios	Cuando se necesita un compromiso de las partes entre los valores adyacentes
Recíprocos	$a_{ij} = 1/a_{ji}$	Hipótesis del método

Fuente: Saaty (1980)

A partir de la definición de las intensidades y con ayuda del panel de expertos, se llevó a cabo la asignación de los pesos para cada comparación entre los criterios generales (ver Figura 2). A la diagonal principal de la matriz de comparación se le asigna la intensidad 1, lo cual refleja la comparación de los criterios entre sí mismos; a los elementos que se encuentran encima de la diagonal se les asigna los valores de las escalas de Saaty, mientras que los elementos inferiores corresponden a los inversos de los elementos superiores.

Criterios Generales	CG _j	CG _k	CG _i	Suma	Pesos	% Pesos
CG _j	1.00	4.00	6.00	11.00	0.6911	69.11
CG _k	0.25	1.00	2.00	3.25	0.2042	20.42
CG _i	0.17	0.50	1.00	1.67	0.1047	10.47
Total	1.42	5.50	9.00	15.9	1.0000	100

Figura 2. Asignación de pesos a los criterios generales

Los resultados de la Figura 2 muestran que el criterio socioeconómico es de mayor importancia que el resto. Lo anterior se basa en el carácter restrictivo que puede tener, por ejemplo: dificultades para la adquisición del terreno y la aceptación comunal. De este modo, este ámbito puede ser una limitante importante para la construcción de un SDF de RCyD.

Ahora bien, el criterio ambiental es el de mediana importancia de acuerdo a la base teórica. Esto da pie a afirmar que la mayoría de las variables derivadas de este criterio no son normadas (mencionadas en la NOM-083-SEMARNAT-2003), sin embargo, deberán cumplirse a pesar de no ser de carácter restrictivo en su totalidad, incluso al no tener una afectación o riesgo en este criterio que pueda afectar al medio ambiente.

Al tener la matriz de comparación, se calculó la razón de consistencia, la cual valida que los juicios no tengan errores entre ellos, es decir, que los juicios sean consistentes. Si este valor es menor a 0.10, se considera que la comparación es aceptable; por lo tanto, si este valor es mayor o igual a 0.10, las opiniones y juicios deben ser revaluados. Las Ecuaciones (1) y (2) y la Tabla 6 muestran las variables y los valores necesarios para la obtención de la razón de consistencia. Para obtener el índice aleatorio para comparaciones entre más de 10 elementos, se debe realizar una interpolación lineal a partir de los dos valores más altos de n y RI de la Tabla 6.

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad \text{Ecuación (1)}$$

Donde

CR: Razón de consistencia

CI: Índice de consistencia

RI: Índice aleatorio

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad \text{Ecuación (2)}$$

Donde

CI: Índice de consistencia

λ_{\max} : Máximo valor propio de la matriz de comparaciones a pares

n: Número de criterios

Tabla 6. Valores de RI con respecto a n

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0	0.52	0.89	1.11	1.25	1.35	1.40	1.45	1.49

En la comparación de los criterios generales, se obtuvo una razón de consistencia de 0.043, el cual es aceptable y, por lo tanto, se considera que los juicios realizados son adecuados.

Para la comparación entre variables se empleó el mismo método utilizado para la comparación entre los criterios generales (ver Figuras 3, 4 y 5). Adicionalmente, las razones de consistencia de cada matriz dieron valores menores al 0.10, por lo que no es necesario reevaluar las opiniones y los juicios emitidos para la asignación de los pesos para las variables.

	Variables	i ₁	i ₂	i ₃	i ₄	i ₅	i ₆	Suma	Peso	%
CG _i	i ₁	1.00	2.00	3.00	3.00	4.00	5.00	18.00	0.34	33.99
	i ₂	0.50	1.00	2.00	2.00	3.00	3.00	11.50	0.22	21.72
	i ₃	0.33	0.50	1.00	2.00	2.00	3.00	8.83	0.17	16.68
	i ₄	0.33	0.50	0.50	1.00	2.00	3.00	7.33	0.14	13.85
	i ₅	0.25	0.33	0.50	0.50	1.00	2.00	4.58	0.09	8.66
	i ₆	0.20	0.33	0.33	0.33	0.50	1.00	2.70	0.05	5.10
	Total	2.62	4.67	7.33	8.83	12.50	17.00	52.95	1.00	100.00

Figura 3. Asignación de pesos a las variables del criterio ambiental

	Variables	j ₁	j ₂	j ₃	j ₄	j ₅	j ₆	j ₇	Suma	Peso	%
CG _j	j ₁	1.00	3.00	4.00	4.00	5.00	5.00	6.00	28.00	0.35	35.38
	j ₂	0.33	1.00	2.00	2.00	3.00	3.00	4.00	15.33	0.19	19.37
	j ₃	0.25	0.50	1.00	1.00	2.00	3.00	3.00	10.75	0.14	13.58
	j ₄	0.25	0.50	1.00	1.00	2.00	2.00	3.00	9.75	0.12	12.32
	j ₅	0.20	0.33	0.50	0.50	1.00	2.00	3.00	7.53	0.10	9.52
	j ₆	0.20	0.33	0.33	0.50	0.50	1.00	2.00	4.87	0.06	6.15
	j ₇	0.17	0.25	0.33	0.33	0.33	0.50	1.00	2.92	0.04	3.68
	Total	2.40	5.92	9.17	9.33	13.83	16.50	22.00	79.15	1.00	100.00

Figura 4. Asignación de pesos a las variables del criterio socioeconómico

	Variables	k ₁	k ₂	k ₃	k ₄	k ₅	k ₆	k ₇	k ₈	k ₉	K ₁₀	K ₁₁	K ₁₂	Suma	Peso	%
CG _k	k ₁	1.00	2.00	2.00	3.00	3.00	4.00	4.00	5.00	5.00	6.00	6.00	7.00	48.00	0.19	18.74
	k ₂	0.50	1.00	1.00	2.00	2.00	3.00	3.00	4.00	5.00	5.00	6.00	6.00	38.50	0.15	15.03
	k ₃	0.50	1.00	1.00	2.00	2.00	3.00	3.00	4.00	4.00	5.00	5.00	6.00	36.50	0.14	14.25
	k ₄	0.33	0.50	0.50	1.00	1.00	2.00	2.00	3.00	3.00	4.00	4.00	5.00	26.33	0.10	10.28
	k ₅	0.33	0.50	0.50	1.00	1.00	2.00	3.00	4.00	3.00	4.00	4.00	5.00	28.33	0.11	11.06
	k ₆	0.25	0.33	0.33	0.50	0.50	1.00	1.00	2.00	2.00	3.00	4.00	5.00	19.92	0.08	7.77
	k ₇	0.25	0.33	0.33	0.50	0.33	1.00	1.00	2.00	2.00	3.00	3.00	4.00	17.75	0.07	6.93
	k ₈	0.20	0.25	0.25	0.33	0.25	0.50	0.50	1.00	1.00	2.00	2.00	4.00	12.28	0.05	4.79
	k ₉	0.20	0.20	0.25	0.33	0.33	0.50	0.50	1.00	1.00	2.00	2.00	3.00	11.32	0.04	4.42
	k ₁₀	0.17	0.20	0.20	0.25	0.25	0.33	0.33	0.50	0.50	1.00	1.00	2.00	6.73	0.03	2.63
	k ₁₁	0.17	0.17	0.20	0.25	0.25	0.25	0.33	0.50	0.50	1.00	1.00	2.00	6.62	0.03	2.58
	k ₁₂	0.14	0.17	0.17	0.20	0.20	0.20	0.25	0.25	0.33	0.50	0.50	1.00	3.91	0.02	1.53
	Total	4.0	6.7	6.7	11.4	11.1	17.8	18.9	27.3	27.3	36.5	38.5	50.0	256.2	1.0	100.0

Figura 5. Asignación de pesos a las variables del criterio técnico

De igual modo, con ayuda del panel de expertos, a cada variable se le asignaron parámetros o condiciones en que se pudieran presentar en los SDF. Por ejemplo, para la variable de Áreas de importancia natural, se definieron dos condiciones: el sitio se encuentra fuera de una zona de importancia natural o el sitio se encuentra dentro de una zona de importancia natural. Asimismo, a cada situación se le asignó un subvalor, el cual corresponde a un grado de idoneidad dentro de un rango de 0 a 3: el 0 indica la condición menos favorable y el 3 la más favorable. En las Figuras 6, 7 y 8 se definen los parámetros de cada variable y su correspondiente grado de idoneidad.

A partir del establecimiento de los parámetros, cada sitio se evaluó por medio de la asignación del subvalor que corresponda a la condición que cumpla o coincida con las características de este; la información se anotó en una tabla que relaciona las variables y los SDF potenciales. Para poder dar una calificación adecuada, se recopiló información realizando visitas de campo, con el propósito de determinar las condiciones del sitio con respecto a las variables que se estaban evaluando. Asimismo, los datos obtenidos se complementaron con investigaciones documentales previamente.

Una vez elaborada la tabla con sus respectivos valores asignados para cada uno de los sitios analizados, se realizaron con la aplicación de las Ecuaciones (3) y (4). De esta forma, se obtuvieron las evaluaciones para cada SDF potencial y se definieron aquellos que mejor se adecúan a las condiciones deseadas. Para fines de este trabajo, cualquier predio con una calificación final mayor a 1.90 se consideró como adecuado.

Criterio General	VARIABLES	Umbral/condición/situación	Normalización
CG _i	i ₁	No existe capa vegetal; el sitio se encuentra en un terreno árido o la capa vegetal ha sido removido por uso anterior	3
		Existe una capa vegetal de menor importancia (pastizales), no hay especies endémicas en el sitio	2
		Existen plantas endémicas de la región en el sitio/presencia de cobertura vegetal densa	1
	i ₂	El sitio se encuentra fuera de una zona de importancia natural	3
		El sitio se encuentra dentro de una zona de importancia natural	0
	i ₃	Permeabilidad lenta; suelos totalmente arcillosos; capas freáticas muy profundas (mayor a 20 m)	3
		Permeabilidad moderada; suelos con afloramientos rocosos; capas freáticas intermedias	2
		Permeabilidad rápida; suelos totalmente arenosos; capas freáticas muy cercanas a la superficie (de 1 a 4 m)	1
	i ₄	En las cercanías del predio se encuentran otras actividades que generan ruido constante, por lo que la generación de ruido por esta actividad no es relevante y/o no existe una localidad en las cercanías que pudiera verse afectada.	3
		En las cercanías del predio no existen otras actividades que generen ruido constante/hay la presencia de localidades en las cercanías que pueden verse afectadas	0
	i ₅	No existe fauna presente en predio o la que se encuentra presente no es de importancia endémica o ambiental	3
		En el predio existe fauna de importancia media o comercial; no son endémicas	2
		En el predio existe fauna de importancia ambiental o endémica	1
	i ₆	En las cercanías del predio no existen aguas superficiales que pudieran verse afectadas por la actividad	3
		El efecto adverso será medianamente significativo sobre el cuerpo receptor	2
		Puede haber una afectación severa en las aguas superficiales de las cercanías por escurrimiento, arrastre de materiales o desvío de cauce.	1

Figura 6. Asignación de condiciones de las variables y los subvalores del criterio ambiental

Criterio General	VARIABLES	Umbral/condición/situación	Normalización
CG _j	j ₁	Tierras de uso común o sin uso actual	3
		Tierras parceladas o de cultivos	2
		Tierras para asentamientos humanos	1
	j ₂	Poblaciones a más de 1000 m de distancia	3
		Poblaciones entre 500 y 1000 m de distancia	2
		Poblaciones a menos de 500 m de distancia	1
	j ₃	El sitio pertenece al municipio o a otra institución estatal, por lo que es fácil la adquisición	3
		El sitio pertenece a un solo propietario privado o varios pero con actitud positiva	2
	j ₄	Existe o puede existir hostilidad hacia el proyecto por parte de los propietarios; no es posible determinar o contactar a todos los propietarios; hay licitaciones concerniente a los títulos de propiedad, se exigen precios exorbitantes o condiciones similarmente desfavorables	1
		El terreno es factible de adquirirse (barato)	3
	j ₅	No es factible de adquirirse el terreno o difícilmente adquirible (caro y no factible)	0
		Aceptación alta. Se han construido en las cercanías otras obras de infraestructura que no han generado el descontento en la comunidad	3
		Aceptación media. Población dividida entre aceptar o no el emplazamiento de la obra, debido a que en la zona de emplazamiento no se han presentado edificaciones de otro tipo de infraestructura o similares	2
	j ₆	Aceptación baja. Se ha presentado el descontento de la población con la realización de obras en la zona de emplazamiento del proyecto	1
		Más de 50% de los trabajadores de la infraestructura a emplazar pertenecen a la zona de influencia o comunidades cercanas	3
		Entre el 20 y el 50% de los trabajadores de la infraestructura a emplazar pertenecen a la zona de influencia o comunidades cercanas	2
	j ₇	Menos del 20% de los trabajadores de la infraestructura a emplazar pertenecen a la zona de influencia o comunidades cercanas	1
		En las cercanías del emplazamiento del proyecto no se evidencia la presencia de grupos u organizaciones no gubernamentales que pudieran confrontar la ejecución de las obras	3
		En las cercanías del emplazamiento del proyecto se evidencia la presencia de grupos u organizaciones no gubernamentales que pudieran confrontar la ejecución de las obras	0

Figura 7. Asignación de condiciones de las variables y los subvalores del criterio socioeconómico

Criterio General	VARIABLES	Umbral/condición/situación	Normalización
CG _k	k ₁	Superficie del predio mayor a 50 ha	3
		Superficie del predio de 25 a 50 ha	2
		Superficie del predio menor a 25 ha	1
	k ₂	El centro de gravedad de las zonas de producción de RCyD se encuentra a menos de 10 km del área de emplazamiento de la obra	3
		El centro de gravedad de las zonas de producción de RCyD se encuentra entre 10 y 20 km del área de emplazamiento de la obra	2
		El centro de gravedad de las zonas de producción de RCyD se encuentra a más de 20 km del área de emplazamiento de la obra	1
	k ₃	Vía de acceso pavimentada hasta el sitio propuesto. Tiene más de 8 m de ancho. No se requiere la construcción de una vía adicional	3
		Vía de acceso pavimentada está a una distancia menor a 500 m del predio considerado. Se debe construir el tramo de acceso	2
		Vía de acceso pavimentada a más de 1 km de distancia	1
	k ₄	Zonas planas a semiplanas o con pequeñas ondulaciones y pendientes menores al 10%	3
		Lomeríos suaves y pendientes máximas de 20%	2
		Terrenos muy abruptos y pendientes mayores de 20%	1
	k ₅	No existe la presencia de infraestructura dentro del predio o en las cercanías que pudieran ser afectadas por la obra a emplazar	3
		Existe la presencia de infraestructura dentro del predio o en las cercanías que pudieran ser afectadas por la obra a emplazar	0
	k ₆	Capacidad mayor a 50 Ton/m ² , con presencia de suelos duros y roca	3
		Terrenos con capacidades de entre 15 y 50 Ton/m ² en suelos intermedios	2
		Capacidad menor a 15 Ton/m ² en suelos blandos	1
	k ₇	No hay una captación de aguas de lluvia dentro del predio o en las cercanías	3
		Hay una captación menor de aguas de lluvia	2
		Hay una captación importante de aguas de lluvia dentro del predio o en las cercanías	1
	k ₈	No existe la presencia de infraestructura dentro del predio o en las cercanías que pudieran ser afectadas por la obra a emplazar	3
		Existe la presencia de infraestructura dentro del predio o en las cercanías que pudieran ser afectadas por la obra a emplazar	0
	k ₉	En horas pico los tiempos de llegada al predio son cortos	3
		El acceso al predio tendría dificultades únicamente en horas pico	2
		En toda hora hábil, el flujo vehicular es pesado, por lo cual se alargan los tiempos de llegada al predio	1
	k ₁₀	En el predio no existen problemas manifiestos de encharcamientos y/o inundaciones	3
		En el predio existen problemas manifiestos de encharcamientos y/o inundaciones	0
	k ₁₁	La zona de la infraestructura no es tectónicamente activa, con presencia de fallas y fracturas; no se han presentado fracturas por desecación de zona lacustre o por sobreexplotación del acuífero	3
		La zona de la infraestructura es tectónicamente activa, con presencia de fallas y fracturas; se han presentado fracturas por desecación de zona lacustre o por sobreexplotación del acuífero	0
	k ₁₂	Suelos duros y roca con deformaciones menores a 5 cm (zona I)	3
		Suelos intermedios con deformaciones menores a 15 cm (zona II)	2
		Suelos blandos con deformaciones de más de 15 cm y presencia de estructuras colindantes y de 30 cm con colindancias (zona III)	1

Figura 8. Asignación de condiciones de las variables y los subvalores del criterio técnico

$$CG_{i,j,k}P_X = \sum_{V=1}^{N_{i,j,k}} [i_{V,X}, j_{V,X}, k_{V,X}] \times [\%i_V, \%j_V, \%k_V] \times [\%CG_i, \%CG_j, \%CG_k] \quad \text{Ecuación (3)}$$

Donde

$CG_{i,j,k}P_X$: Valor resultante de la evaluación del criterio general i, j o k , para el sitio X

$N_{i,j,k}$: Número total de variables del criterio general i, j o k

$[i_{V,X}, j_{V,X}, k_{V,X}]$: Subvalor asignado a la variable V del criterio general i, j o k , para el sitio X

$[\%i_V, \%j_V, \%k_V]$: Porcentaje asignado a la variable V del criterio general i, j o k

$[\%CG_i, \%CG_j, \%CG_k]$: Porcentaje asignado al criterio general i, j o k

$$TP_X = CG_iP_X + CG_jP_X + CG_kP_X \quad \text{Ecuación (4)}$$

Donde

TP_X : Valor total de la suma de las evaluaciones de los criterios generales i, j y k , para el sitio X

CG_iP_X : Valor resultante de la evaluación del criterio general i , para el sitio X

CG_jP_X : Valor resultante de la evaluación del criterio general j , para el sitio X

CG_kP_X : Valor resultante de la evaluación del criterio general k , para el sitio X

Resultados

Derivado de la metodología expuesta para la evaluación de los SDF potenciales, en la Figura 7 se presenta el resumen de los resultados obtenidos por sitio. Al obtener una calificación mayor a 1.90, cuatro predios se consideran como aptos: Ajusco (P_1), Xico 0 (P_8), Xico 1 (P_9) y Xico 3 (P_{12}).

Sin embargo, como criterio de desempate, se decidió elegir el sitio con mayor superficie, mejor accesibilidad, cercanía con las fuentes de generación de RCyD, entre otras características. De tal forma, el predio Xico 0 quedó como el SDF de RCyD elegido. Como se observa en la Figura 1, este predio queda en la delegación Tláhuac, cerca del límite con el Estado de México, y cuenta con una superficie aproximada de 213 ha, siendo el sitio más grande de todas las opciones.

Criterio General	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆	P ₇	P ₈	P ₉	P ₁₀	P ₁₁	P ₁₂
CG _i	0.274	0.119	0.277	0.277	0.277	0.137	0.114	0.277	0.277	0.277	0.153	0.259
CG _j	1.659	0.771	1.112	1.078	1.164	0.796	0.796	1.204	1.246	1.204	1.119	1.425
CG _k	0.500	0.492	0.435	0.369	0.369	0.387	0.493	0.425	0.412	0.323	0.381	0.431
Calificación Final	2.432	1.382	1.824	1.724	1.809	1.320	1.403	1.905	1.935	1.804	1.652	2.116

Tipología

	Sitio más viable para ubicar un SDF
	Sitio de viabilidad media para ubicar un SDF
	Sitio no viable para ubicar un SDF

Figura 7. Calificaciones de los SDF de RCyD potenciales

Conclusiones

Como se mencionó al inicio de este trabajo, los predios Cerro de la Estrella (P₂), Tlalpan 1 (P₆) y Tlalpan (P₇) se ubicaron dentro de un área de importancia natural. De esta forma, se observa que aquellos sitios se consideran como inviables para ubicar un SDF de RCyD, además de que cuentan con las evaluaciones más bajas de todos. Por lo tanto, se puede concluir que el método empleado es adecuado, lo cual también se refleja en los valores de las razones de consistencia.

Asimismo, es importante definir algún valor mínimo para las evaluaciones finales de los sitios: como se observó en este trabajo, el predio Ajusco obtuvo la mayor calificación, sin embargo no fue elegido como el más viable para ubicar un SDF de RCyD. Dependiendo del grado de exigencia que se deba cumplir, este valor mínimo puede ser mayor o menor a 1.90.

Adicionalmente, la correcta aplicación de esta técnica, en conjunto con un grupo interdisciplinario de especialistas, permite localizar cualquier clase de sitios para la construcción de otro tipo de infraestructura, siempre y cuando se elijan las variables y los criterios más adecuados, con base en las condiciones que deben cumplir los predios.

Agradecimientos

A la Secretaría de Ciencia, Tecnología e Innovación (SECITI) por patrocinar este trabajo en el marco del proyecto 'Desarrollar una metodología general para localizar sitios de disposición final de Residuos de la Construcción y Demolición, y aplicarla a la Ciudad de México como caso de estudio', desarrollado entre 2016 y 2017.

Referencias bibliográficas

- CMIC, Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción (2013) *Plan de manejo de residuos de la construcción y la demolición*. Cámara Mexicana de la Industria de la Construcción, México, Ciudad de México, 99 pp. Consultado el 26 de septiembre de 2016, desde: <http://www.fic.org.mx/OTTIC/CMIC/PMrcdCompleto.pdf>
- Habitat, United Nations Centre for Human Settlements (1996) *Policies and Measures for Small-Contractor Development in the Construction Industry*, UN-HABITAT, Nairobi, 118 pp.
- Nagapan, S., Rahman, I., Asmi, A. (2011) *A Review of Construction Waste Cause Factors*. Consultado el 16 de abril de 2017, desde: <https://www.researchgate.net/publication/258224434>
- PAOT, Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial (2010) *Estudio de zonas impactadas por tiraderos clandestinos de residuos de la construcción en el Distrito Federal*. Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial, México, Ciudad de México, 124 pp. Consultado el 12 de abril de 2017, desde: <http://centro.paot.org.mx/documentos/paot/estudios/EOT-02-2010.pdf>
- Romero, E. (2007) *Residuos de construcción y demolición*. Universidad de Huelva, España, 25 pp. 26 de septiembre de 2016, desde: <http://www.uhu.es/emilio.romero/docencia/Residuos%20Construccion.pdf>
- Saaty, T. (1980) *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*, McGraw-Hill, New York, 287 pp.
- SEDEMA, Secretaría del Medio Ambiente (2013). Norma Ambiental para el Distrito Federal NADF-007-RNAT-2013, Gaceta Oficial del Distrito Federal, jueves 26 de febrero de 2015.



SEDESOL, Secretaría de Desarrollo Social (1996) *Manual para la Operación de Rellenos Sanitarios*. Secretaría de Desarrollo Social, México, 271 pp. 26 de septiembre de 2016, desde:

http://www.sustenta.org.mx/3/wp-content/files/MT_OperacionRellenoSanitario.pdf

SEMARNAT, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2012) *Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos, edición 2012*. Consultado el 26 de septiembre de 2016, desde:

http://www.inecc.gob.mx/descargas/dgcenica/diagnostico_basico_extenso_2012.pdf

SMA, Secretaría del Medio Ambiente (2008) Norma Técnica Estatal Ambiental NTEA-011-SMA-RS-2008, Periódico Oficial del Gobierno del Estado Libre y Soberano de México, jueves 21 de mayo de 2009.