

Metodología de diseño para la recogida de residuos sólidos urbanos mediante factores punta de generación: sistemas de caja fija (SCF)

A methodology for designing urban solid waste collection by means of extreme generation factors: fixed box systems (FBS)

Carlos Alfonso Zafra Mejía¹

RESUMEN

El desarrollo económico y de la sociedad de consumo implica una gran producción de residuos sólidos en una localidad, hecho que se constituye en un serio problema ambiental si no se cuenta con la infraestructura adecuada para su gestión integral. En este artículo se presenta un desarrollo metodológico para el diseño de la recogida de residuos sólidos urbanos con sistemas de caja fija (SCF), considerando la variación temporal en las cantidades generadas y recolectadas. La variación temporal se ha incluido mediante el análisis de tres factores punta de generación: coeficiente punta semanal (C_{ps}), coeficiente punta diario (C_{pd}) y coeficiente punta diario de distribución heterogénea (C_{pdh}). Esta consideración temporal permite realizar diseños razonables que se ajusten a las tasas máximas de generación y recolección. El modelo propuesto considera la producción per cápita (PPC), el coeficiente punta semanal (C_{ps}) y el coeficiente punta de distribución heterogénea (C_{pdh}). Finalmente, la metodología propuesta puede ser utilizada para la selección del equipamiento y tamaño de las unidades de gestión integral de los residuos sólidos urbanos.

Palabras clave: producción per cápita, suciedad urbana, residuo sólido, gestión integral, sistemas de caja fija, RAS 2000.

ABSTRACT

Economic development and that of consumer society implies large-scale production of solid waste in any determined locality. This becomes a serious environmental problem if there is no suitable infrastructure for its integral management. This paper presents a methodology for designing urban solid waste collection using fixed box systems (FBS), considering temporary variations in the amounts generated and collected. Temporary variation has been included by analysing three generation point factors: weekly extreme coefficient (WEC), daily extreme coefficient (DEC) and daily extreme coefficient of heterogeneous distribution (DECH). Such time-based consideration allows making reasonable designs which can be adjusted to maximum generation and collection rates. The proposed model considers per capita production (PCP), weekly extreme coefficient (WEC) and daily extreme coefficient of heterogeneous distribution (DECH). The proposed methodology can be used for selecting the equipment and the size of the integral management units for urban solid waste.

Keywords: per capita production, urban dirt, solid waste, integral management, fixed box system, RAS 2000.

Recibido: julio 11 de 2008

Aceptado: junio 1 de 2009

Introducción

La suciedad urbana puede definirse como la deposición de materiales sobre la superficie de la ciudad. Su origen puede ser muy variado, al igual que sus características. Puede llegar a cambiar el aspecto, el color o la prestancia de la localidad. Los problemas que crea se pueden agrupar de la siguiente forma: sanitarios (proliferación de animales-vectores), estéticos, de seguridad, de incidencia sobre la actividad humana y los causados por el deterioro del mobiliario urbano (Foster, 1979; López, 1980; Karagiannidis et al., 2004).

Los residuos sólidos urbanos (RSU) forman parte de la realidad diaria. En épocas recientes el volumen de desperdicios urbanos ha llegado a tales niveles de producción que su recogida y elimina-

ción constituye uno de los principales problemas al que se enfrentan las municipalidades (Karadimas et al., 2007). Los principales factores que han dado lugar a esta situación son el rápido crecimiento demográfico, la concentración de la población en centros urbanos, la utilización de bienes materiales de rápido envejecimiento, y el uso, cada vez más frecuente, de envases sin retorno fabricados con materiales poco o nada degradables (Salvato et al., 2003; Mosler et al., 2006).

Los esfuerzos de los países de la región para mejorar las condiciones de vida de la población se han visto fuertemente limitados por el estado de deterioro del entorno y, en particular, por las insuficientes coberturas de saneamiento básico. En el caso de Colombia, los procesos políticos y económicos de las últimas décadas han generado un fenómeno significativo de migración desde el campo a la ciudad, que han agudizado la situación de déficit de

¹ Ingeniero civil. Especialista, en Ingeniería ambiental, Universidad Industrial de Santander, Colombia. M.Sc. en Ingeniería sanitaria y ambiental. Ph.D., en Ingeniería ambiental, Universidad de Cantabria, España. Profesor asistente, Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia. czafra@udistrital.edu.co.

los servicios de saneamiento básico en las áreas urbanas. Paralelamente, se ha experimentado una progresiva toma de conciencia en relación con los problemas de deterioro ambiental (OPS, 1996). Estos aspectos relevantes deben ser considerados en el desarrollo de la política de gestión integral de los RSU en nuestro país (Ministerio del Medio Ambiente, 1998).

El país carece de información con relación al desarrollo de metodologías unificadas de diseño para el sector de los RSU. La poca información disponible está dispersa y, con frecuencia, no es compartida entre las distintas instituciones, por lo que la duplicación de esfuerzos es común. Hay experiencia en la aplicación de metodologías para la gestión de los RSU; sin embargo, gran parte de las experiencias exitosas se hacen difícilmente replicables por falta de registro sistemático y de evaluación.

En términos generales, no existe suficiente información que permita la generación y medición de indicadores relacionados con el manejo de los residuos sólidos (e.g., beneficios económicos de su manejo, en la salud, en la preservación del medio ambiente, en el mejoramiento de la calidad de vida, etc.) (Contraloría General de la República, 2005).

El Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico-RAS (Ministerio de Desarrollo Económico, 2000) establece en el título "F" los requisitos técnicos para los sistemas de aseo urbano en el país. En lo referente a la recolección, es necesario generar una metodología que sirva de guía a los diseñadores en la estimación del número de contenedores y vehículos de recolección necesarios en una localidad.

El desarrollo de una metodología unificada para el cálculo de los sistemas y equipos de la recogida es el punto de partida en la gestión integral de los mismos; es fundamental para el diseño de las instalaciones de recuperación de materiales (IRM), de transferencia y de disposición final. Por otra parte, y aun cuando los costos de disposición de los residuos sólidos crecen rápidamente, los costos de su recolección continúan siendo los mayores ítems del presupuesto en las localidades (Ronen *et al.*, 1983).

La recogida "intraedificacional" o "prerrecogida" comprende las actividades de manipulación, procesamiento y almacenamiento de los residuos hasta que son depositados en los puntos de recogida o presentación (contenedores) (Ferrer *et al.*, 2002). Los principales factores a considerar son: el transporte de los residuos desde el lugar de generación, en las propias viviendas, y el lugar de acumulación (localización), el tipo de contenedor que se va a implementar, el tipo de recogida por parte de los servicios de aseo urbano, y el efecto del almacenamiento sobre la masa de residuos depositada (e.g., descomposición, densidad, etc.), la salud pública y el paisaje (U.S. EPA, 2000).

La recogida de RSU se puede definir como la recolección de los mismos por el personal y el equipo (vehículos de recolección) disponible para ello, con la finalidad de ser trasladados hasta el lugar de tratamiento o eliminación, o hasta una planta de transferencia previa (Hontoria y Zamorano, 2000).

En los sistemas de recolección de caja fija (SCF) los contenedores utilizados para el almacenamiento de los residuos permanecen en los puntos de presentación (Shuster y Schur, 1974). Este sistema de recogida varía según el número de puntos de generación y el tipo y la cantidad de residuos por recolectar. Existen principalmente dos tipos de sistemas, los de carga manual y los de carga mecanizada. Por las ventajas económicas implicadas, casi todos los vehículos de recolección utilizados actualmente van equipados con

mecanismos internos de compactación (Tchobanoglous *et al.*, 1994). Estos vehículos de recolección reciben el nombre de camiones recolectores compactadores (CRC).

Para establecer las necesidades de vehículos de recolección se debe determinar el tiempo unitario necesario para llevar a cabo esta tarea. Al separar las actividades de recolección en operaciones unitarias se pueden desarrollar datos de diseño y relaciones que permiten evaluar las variables asociadas con las actividades de recolección y las controladas por la localización individual de los puntos de presentación (Clark y Gillean, 1975; Tchobanoglous *et al.*, 1994; Smith, 1997).

La estimación de las cantidades generadas de RSU normalmente se basa en la cantidad de residuos producidos por una persona por día. Esta producción específica o per cápita (PPC) en la mayoría de los casos no refleja la cantidad de residuos generada, sino la cantidad de residuos recolectada. La diferencia entre la cantidad generada y la cantidad de residuos recolectados para su procesamiento o vertido varía normalmente entre 4%-15% (Tchobanoglous *et al.*, 1994). Las diferencias se pueden justificar por la cantidad de material fermentado, quemado, arrojado a las alcantarillas o canalizaciones urbanas, donado, vendido y recuperado para reciclaje.

La metodología más acertada para la selección del equipo y el tamaño de las unidades de gestión de los residuos sólidos será aquella que considere la variación temporal en las cantidades generadas y recolectadas (Sufian y Bala, 2007). Las tasas máximas y mínimas de generación se deben considerar con la inclusión de los "factores punta de generación de residuos". En el caso de poseer datos de generación, los factores punta se estiman mediante la relación entre los valores máximos y mínimos de generación anual, y la producción media anual de residuos de la comunidad en estudio; de lo contrario, se deberá desarrollar un criterio de variación temporal de las cantidades generadas y recolectadas que tenga en cuenta la producción extrema y la frecuencia en la recolección de los residuos sólidos, entre otros factores.

El objetivo principal del presente artículo es desarrollar una metodología para el diseño y la evaluación de la prerrecogida (contenedores) y recogida (vehículos de recolección) de RSU con sistemas de caja fija (SCF), cuando existe o no información acerca de las tasas de generación y recolección en una localidad. Se pretende establecer criterios de diseño que consideren la variación temporal en las tasas de generación y recolección a partir de los trabajos realizados por varios investigadores. Este artículo inicia con una exposición teórica del método propuesto. Posteriormente, se realiza la presentación y análisis de un caso de aplicación. Finalmente, se despliegan las principales conclusiones de la investigación.

Metodología

1. Población actual y futura. El conocimiento de la población actual y futura se constituye en una información de extrema importancia en la gestión integral de los RSU, puesto que la generación y recolección de residuos está estrechamente relacionada con el número de habitantes, y con el tamaño y crecimiento de las localidades, entre otros factores (Jaramillo, 1999). La estimación de la población urbana es el aspecto principal en la definición del nivel de complejidad. Se establece que esa población debe corresponder a la proyectada al final del periodo de diseño (RAS, 2000). Dependiendo del nivel de complejidad se establecen métodos de cálculo para estimar la población futura (Tabla 1).

Tabla 1. Métodos de cálculo permitidos según el nivel de complejidad del sistema (RAS, 2000)

Método	Nivel de complejidad del sistema			
	Bajo	Medio	Medio alto	Alto
Aritmético, geométrico y exponencial	X	X		
Aritmético + geométrico + exponencial + otros			X	X
Por componentes			X	X
Detallar por zonas y detallar densidades			X	X

2. Producción media de RSU, Pr. La producción per cápita, *PPC*, se define como la cantidad generada de residuos por un habitante por día (Kg/[habitante*día]). Los métodos utilizados para estimar la *PPC* (número de cargas, peso-volumen y balance de masas) tienen en cuenta la cantidad de residuos generados por día y el número de habitantes del área en estudio. Se han establecido valores típicos de *PPC* para el país (Tabla 2); estos pueden ser empleados cuando no se cuenta con la información necesaria para su determinación.

Tabla 2. Valores típicos de *PPC* (Kg/[habitante*día]) para municipios colombianos (RAS, 2000)

Nivel de complejidad	Valor mínimo	Valor máximo	Valor promedio
Bajo	0.30	0.75	0.45
Medio	0.30	0.95	0.45
Medio alto	0.30	1.00	0.53
Alto	0.44	1.10	0.79

Además de las cantidades generadas de RSU es necesario conocer su composición física, es decir, los componentes individuales que constituyen el flujo de los residuos y su distribución relativa dada normalmente como porcentaje en peso. Una clasificación de los componentes es por su naturaleza orgánica (combustible) e orgánica. La fracción combustible incluye residuos como el papel, cartón, plásticos, textiles, goma, cuero, madera, residuos de jardín y de comida, mientras que la inorgánica estará conformada principalmente por vidrio, cerámica, metales y cenizas (ASTM, 1992).

En la Tabla 3 se presentan los resultados de diversos estudios acerca de la composición física de los RSU en Colombia, y según el nivel de ingresos del país.

Tabla 3. Composición física de los RSU para varias ciudades y según el ingreso per cápita por habitante

Componente (%)	Países de bajos ingresos ^a	Países de medianos ingresos ^a	Bogotá ^b	Calí	Medellín ^d
Orgánicos					
Residuos de comida	40-85	20-65	64.3	82.4	59.5
Papel y cartón	1-10	8-30	8.2	7.9	12.0
Plásticos y caucho	1-5	1-6	18.7	2.6	11.3
Textiles	1-5	2-10	4.0	0.8	1.9
Cuero	1-5	1-4	0.3	-	0.3
Madera	1-5	1-10	0.6	1.4	-
Inorgánicos					
Vidrio	1-10	1-10	1.0	1.6	2.7
Metales	1-5	1-5	0.8	0.1	1.3
Suciedad, cenizas, etc.	1-40	1-30	2.1	3.2	3.0

Nota: a: (Cointreau et al., 1985); b: (UESP, 2004); c: (OPS, 1996); d: (Corantioquia, 2006).

El diseño de los sistemas y equipos para la gestión integral de los RSU no puede realizarse a partir de datos actuales de *PPC* y composición física, sino sobre estimaciones de generación y composición que se van a presentar en los próximos años. De lo contrario puede ocurrir que se diseñen instalaciones para grandes cantidades de materia que luego no se aprovechen porque se ha dejado de utilizar ese material o han cambiado los hábitos de consumo. Cuando se planifica a largo plazo es fundamental analizar cuidadosamente la tendencia en la producción y composición de los RSU.

Para estimar cómo evolucionará a lo largo del tiempo la corriente de RSU en un área o lugar concreto, han de conocerse primero los factores que afectan su producción per cápita y composición física. La *PPC* y la composición se verán afectadas por unos condicionantes u otros según el tipo de residuo de que se trate, pero en general estos pueden agruparse en tres clases principales. Los políticos: reducción en origen, legislación y actitudes públicas; los geográficos: crecimiento demográfico y clima; y los de estilo de vida: nivel de desarrollo de la localidad (producto interno bruto, PIB), variaciones estacionales y periodos vacacionales (Lobo, 2000).

Para estimar la *PPC* futura se recomienda utilizar tasas de crecimiento anual entre 0,5-1%, de tal manera que las poblaciones pequeñas (nivel de complejidad bajo) tengan un bajo crecimiento y las grandes, con un nivel de complejidad alto, tiendan a 1% (Collazos, 2005). Existen tres métodos para el estudio detallado de la composición física de la corriente de RSU. El análisis de productos residuales se basa en el análisis químico elemental de productos resultantes de un proceso de tratamiento; el de mercado (análisis preconsumo) se fundamenta en el estudio del ciclo de vida de un material de la localidad en estudio; y el muestreo directo es el más empleado hoy día, y consiste en analizar muestras de residuos tomadas antes de cualquier procesamiento o separación (Lobo, 2000).

La producción media diaria de RSU (actual y futura) se calcula con la siguiente expresión:

$$Pr = PPC * Población \quad (1)$$

Donde *Pr* representa la producción media diaria de RSU en Kg/d; *PPC*, la producción per cápita de RSU en Kg/[habitante*día]; y *Población*, el número de habitantes actuales o futuros de la localidad en estudio.

Producción de diseño para la prerrecogida y recogida de RSU, Prd.

a. Factores punta de generación. Los factores o coeficientes punta utilizados para considerar la variación temporal en las tasas de generación y recolección de los RSU son los siguientes:

Coficiente punta semanal, Cps. Este coeficiente punta permite incluir en el diseño la máxima variación semanal/anual en la producción de RSU. Si existen datos anuales de generación en una localidad el *Cps* se obtiene a través de la siguiente expresión:

$$Cps = \frac{Pps}{Pmd} \quad (2)$$

Donde *Cps* representa el coeficiente punta semanal, adimensional; *Pps*, la máxima producción diaria semanal de RSU en un año, en Ton/día; y *Pmd*, la producción media diaria de RSU para el mismo año, en Ton/día.

La Figura 1 muestra la variación semanal anual en la producción de RSU para una población española de 250.000 habitantes, la cual genera al año 11.160.200 toneladas de residuos sólidos, con

una media diaria anual de 30,5 Ton/día ($PPC = 1,22 \text{ Kg/}[\text{habitante} \cdot \text{día}]$). Por lo tanto, el Cps será igual a la relación entre la producción de la semana 33 (máxima) y la media diaria anual (Figura 1).

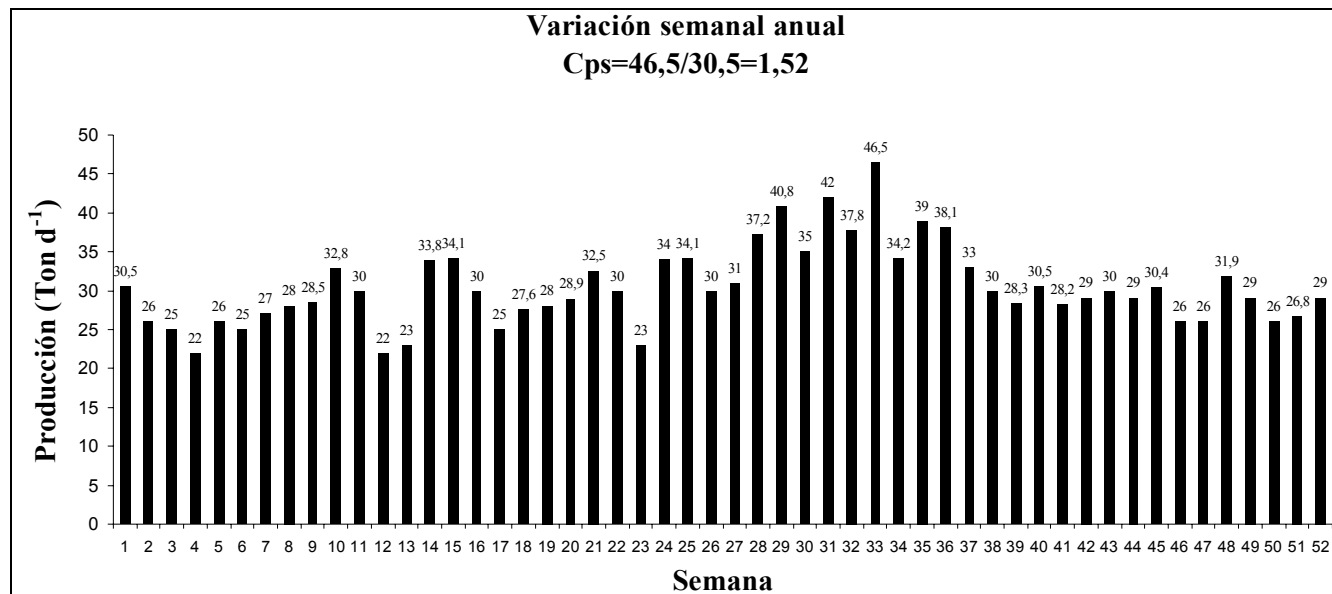


Figura 1. Variación semanal anual en la producción de RSU para una población española de 250.000 habitantes (UC-GIA, 1998)

Los valores típicos del Cps oscilan entre 1,5-1,9 (Tejero et al., 2001), de tal manera que las poblaciones pequeñas (nivel de complejidad bajo) se acerquen a 1,9 debido a la homogeneidad en las costumbres, y las grandes a 1,5 (nivel de complejidad alto), por la heterogeneidad en los hábitos. Tchobanoglous et al. (1994) presentan valores típicos entre 1,25-2.

Coficiente punta diario, Cpd . Este coeficiente punta permite incluir en el diseño la máxima variación diaria en la producción de RSU. Si existen datos anuales de generación en una localidad el Cpd se obtiene a través de la siguiente expresión:

$$Cpd = \frac{Ppd}{Pmd} \quad (3)$$

Donde Cpd representa el coeficiente punta diario, adimensional; Ppd , la máxima producción diaria de RSU en un año, en Ton/día; y Pmd la producción media diaria de RSU para el mismo año, en Ton/día.

La Figura 2 muestra la máxima variación diaria en la producción de RSU para una población española de 250000 habitantes, la cual genera al año 11.160.200 toneladas de residuos sólidos con una media diaria anual de 30,5 Ton/día ($PPC = 1,22 \text{ Kg/}[\text{habitante} \cdot \text{día}]$). Por lo tanto, el Cpd será igual a la relación entre la producción máxima diaria/anual (jueves) y la media diaria/anual (Figura 2). Tchobanoglous et al. (1994) y Tejero et al. (2001) presentan valores típicos del Cpd entre 1,5-2,5. Las poblaciones pequeñas (nivel de complejidad bajo) se acercarán a 2,5 debido a la homogeneidad en las costumbres, y las grandes a 1,5 (nivel de complejidad alto), por la heterogeneidad en los hábitos.

En el caso de que la producción semanal máxima de residuos sea recogida en los siete días, se obtendría una cierta distribución heterogénea que para la semana máxima puede llegar a producir una punta diaria entre 1,5-2,5, dependiendo del tamaño de la población. Este factor punta (Cpd) no se tendrá en cuenta porque puede llevar a sobreestimaciones en las cantidades generadas y recolectadas. De lo contrario, se estará asumiendo que en todos los

días de la semana de máxima producción se están presentando puntas diarias en la generación y recolección de RSU, lo cual es poco probable en la práctica.

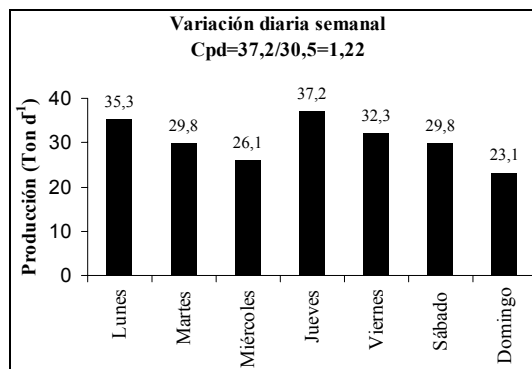


Figura 2. Variación diaria anual máxima en la producción de RSU para una población española de 250.000 habitantes (UC-GIA, 1998)

Coficiente punta diario de distribución heterogénea, $Cpdh$. Si la recogida no se hace todos los días de la semana, hay que añadir el factor de distribución heterogénea provocado por la recogida. Los residuos recogidos varían en función del número de recogidas y de la distribución de estas a lo largo de la semana. Para el cálculo del coeficiente punta diario de distribución heterogénea se puede emplear el siguiente intervalo:

$$Cpdh = \left[\frac{7}{n}; 1 + \frac{7}{n} \right] \quad (4) \text{ (Tejero et al., 2001)}$$

Donde n representa el número de días a la semana en los cuales se realizan las operaciones de recogida de los RSU (frecuencia de recolección). El intervalo tiene en cuenta dos extremos en las cantidades generadas y recolectadas. El límite inferior considera que la cantidad generada y recogida de RSU se distribuye uniformemente durante la semana, según sea la frecuencia en la recolección. Por otro lado, la parte entera del límite superior tiene en cuenta la

cantidad generada y recogida durante el número máximo de días sin servicio de recolección, según sea su frecuencia. Como se puede apreciar, la magnitud del coeficiente de distribución heterogénea dependerá de la frecuencia en la recolección de los RSU establecida en la localidad.

En la Figura 3 se muestra la distribución de la recogida para dos días por semana. Según el límite inferior del intervalo planteado para el cálculo del $Cpdh$, para una generación uniforme de los RSU durante la semana es necesario que los equipos los recolecten cada 3,5 días (Figura 3a). Por otro lado, la parte entera del límite superior demuestra que el número máximo de días sin servicio de recolección es de 4 (Figura 3b).

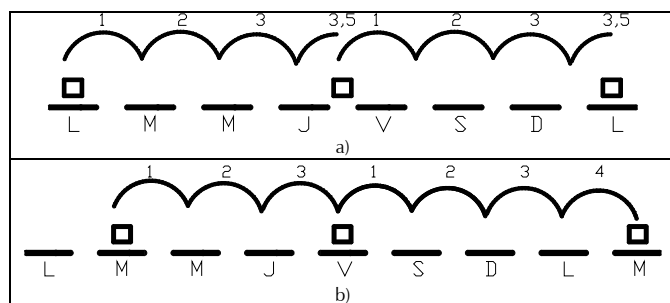


Figura 3. Esquema de la recogida semanal para dos días

b. Producción de diseño, Prd. Para calcular la producción de diseño de la prerrecolecta (contenedores) y recogida (CRC) de RSU, se utiliza la siguiente expresión:

$$Prd = PPC * Población * Cps * Cpdh \quad (5)$$

Donde Prd representa la producción de diseño para la prerrecolecta y recogida en Kg/día; PPC , la producción per cápita de RSU en Kg/[habitante*día]; y Cps y $Cpdh$, el coeficiente punta semanal y diario de distribución heterogénea, respectivamente (adimensionales).

4. Diseño de los sistemas para la prerrecolecta (contenedores).

Para el diseño de la prerrecolecta es necesario predefinir la capacidad de los contenedores a emplear. Los tipos y las capacidades de los contenedores a instalar dependen de las características y tipos de los residuos sólidos que hay que recoger, del tipo de sistema de recogida utilizado, de la frecuencia de recogida y del espacio disponible para disponer los contenedores. Las capacidades comerciales normalmente son las siguientes: 90, 120, 140, 240, 360, 700, 800, 1.000, 1.100, 2.400 y 3.200 litros (Contenur, 2007). Igualmente, se debe predefinir la densidad media de los residuos en el interior del contenedor. Valores típicos entre 120-300 Kg/m³ (Pineda, 1998; U.S. EPA, 2000). El número de contenedores requeridos para la prerrecolecta se calcula con la siguiente expresión:

$$\text{Contenedores} = \frac{Prd}{\rho * V} \quad (6)$$

Donde Prd representa la producción de diseño de los sistemas de prerrecolecta en Kg/día; ρ , la densidad de los residuos en el interior del contenedor en Kg/m³; y V , la capacidad del contenedor seleccionado en m³.

5. Diseño de los equipos para la recolección (CRC). Para el diseño de la recogida es necesario predefinir el tipo de camión a utilizar. Especificaciones técnicas como la capacidad de la caja y el grado de compactación de los residuos, son muy importantes para determinar la duración del itinerario de la recogida. Las caracterís-

ticas técnicas generales de los camiones recolectores compactadores de carga trasera fabricados por industrias colombianas son las siguientes: capacidad de la caja entre 6,1 m³ (8 yd³) y 18,3 m³ (24 yd³), y la densidad de compactación del CRC oscila entre 450-750 Kg/m³ (Búfalo, 2007; Fanalca, 2007).

a. Número de puntos de presentación atendidos por CRC.

$$\text{Puntos/CRC} = \frac{Vc * \rho c}{V * \rho} \quad (7)$$

Donde Vc y V representan la capacidad del CRC y del contenedor en m³; y ρc y ρ , la densidad de los residuos depositados en el interior del CRC y el contenedor, en Kg/m³.

b. Itinerario de la recogida por CRC. El itinerario de recogida está constituido por los siguientes tiempos:

Tiempo de toma de los contenedores: es el tiempo requerido para cargar un contenedor. Depende principalmente de la colocación del contenedor y la habilidad del conductor. Valores típicos para contenedores de carga lateral entre 65-70 segundos. Para contenedores de cuatro ruedas y carga manual trasera el tiempo oscila entre 35-37 segundos (UC-GIA, 1998).

Tiempo de transporte entre puntos de presentación: es el tiempo requerido para desplazarse entre los puntos de presentación de RSU. Depende fundamentalmente de la distancia entre puntos, la localización de los contenedores, el horario y el diseño de la vía. En términos generales la velocidad media de transporte entre puntos aumenta a medida que la distancia también lo hace. Por ejemplo, para una ciudad española de 250.000 habitantes se desarrollaron dos expresiones para estimar el tiempo de transporte (segundos) entre puntos de presentación. La primera corresponde a lugares sin congestión vial y fácil acceso a los puntos de recogida ($T=3,7+0,168*X$); por el contrario, la segunda expresión desarrollada corresponde a lugares con congestión vial y difícil acceso a los puntos de presentación ($T=9,9+0,197*X$). Estas expresiones dependen únicamente de la distancia media (X en metros) entre puntos de presentación (UC-GIA, 1998).

Tiempo de transporte de ida y vuelta al sitio de disposición final: es el tiempo comprendido desde el llenado del CRC en el último punto de presentación, y el transporte al sitio de disposición final, incluyendo su regreso al primer punto de recolección. Depende fundamentalmente del horario y el diseño de la vía.

Tiempo de descarga en el interior del sitio de disposición final: es el tiempo comprendido desde la llegada del vehículo al sitio de disposición final hasta su salida. Su estimación es función del tipo de superficie del área de disposición, facilidades de maniobrabilidad del vehículo, tamaño del vehículo, procesos de pesaje y el tiempo gastado en la compactación (RAS, 2000).

Tiempo muerto: es la suma de tiempos de viaje desde el garaje hasta la ruta de recolección al comenzar el día de trabajo; tiempos de viaje desde el sitio de disposición final al sitio de estacionamiento de los vehículos de recolección al terminar el día; tiempos inherentes a la cuadrilla, como almuerzos, fatigas que afectan la eficiencia del recolector, despacho de vehículos, accidentes, etc. (RAS, 2000). Valores típicos entre 5-10% (Tejero et al., 2001).

El tiempo total del itinerario de la recogida por CRC en horas se calcula con la siguiente expresión:

$$T_{\text{itinerario}} = (n * T_{\text{toma}} + (n - 1) * T_{\text{puntos}} + T_{\text{transporte}} + T_{\text{descarga}}) * (1 + T_{\text{muerto}}) \quad (8)$$

Donde n representa el número de puntos de presentación de RSU atendidos por CRC; T_{toma} , T_{puntos} , $T_{transporte}$ y $T_{descarga}$, representan los tiempos de toma de los contenedores, de transporte entre puntos de presentación, de transporte de ida y vuelta al sitio de disposición final, y de descarga en el interior del relleno sanitario, en horas, respectivamente; y T_{muerto} representa el tiempo muerto en tanto por uno.

c. Número de itinerarios necesarios por día. El número de itinerarios necesarios para recolectar la producción diaria de RSU de diseño se calcula con la siguiente expresión:

$$Itinerarios = \frac{Prd}{Vc * \rho c} \quad (9)$$

Donde Prd representa la producción de diseño para la recogida en Kg/día; y Vc y ρc , el volumen de la caja y la densidad de los residuos en el interior del CRC, en m^3 y Kg/m^3 , respectivamente.

d. Número de viajes por jornada laboral. El número de viajes por jornada laboral se calcula con la siguiente expresión:

$$Viajes = \frac{JL}{Titinerario} \quad (10)$$

Donde JL y $Titinerario$ representan la jornada laboral y el tiempo total del itinerario de recogida por CRC en horas, respectivamente.

e. Número total de camiones (CRC). El número total de camiones necesarios para la recogida de los RSU se calcula con la siguiente expresión:

$$CRC = \frac{Itinerarios}{Viajes} \quad (11)$$

Donde $Itinerarios$ representa el número de itinerarios necesarios para recolectar la producción de RSU de diseño, y $Viajes$, el número de viajes por jornada laboral que puede realizar un CRC.

Ejemplo de aplicación

1. Población actual y futura. La población de la localidad en estudio para el año 2008 será de 200.000 habitantes (asumida). Nivel de complejidad alto (RAS, 2000).

2. Producción media de RSU, Pr. La PPC según el nivel de complejidad es de 0,79 Kg/[habitante*día] (RAS, 2000). La PPC para el año 2008 con una tasa de crecimiento anual del 1% (modelo lineal) será de 0,85 Kg/[habitante*día]. Según el estudio de composición física futura de los residuos sólidos en la localidad (asumido) se diseñará un sistema de recogida selectiva para separar dos fracciones: reciclable (30%) y resto (70%).

Fracción resto:

$$Pr = PPC * Población * \%Resto = 0,85 * 200.000 * 0,7 = 119 \text{ Ton/d} \quad (12)$$

Fracción reciclable:

$$Pr = PPC * Población * \%Reciclable = 0,85 * 200.000 * 0,3 = 51 \text{ Ton/d} \quad (13)$$

3. Producción de diseño para la prerrecogida y recogida, Prd.

a. Factores punta de generación. Coeficiente punta semanal, Cps , de 1.5; correspondiente para poblaciones grandes o con un nivel de complejidad alto (RAS, 2000; Tejero et ál., 2001).

Fracción resto: Coeficiente punta diario de distribución heterogénea, $Cpdh$, para una frecuencia de recolección de la fracción resto de tres días por semana:

$$Cpdh = \left[\frac{7}{n}; 1 + \frac{7}{n} \right] = \left[\frac{7}{3}; 1 + \frac{7}{3} \right] = [2,33; 3] \Rightarrow Cpdh = \frac{2,33 + 3}{2} = 2,67 \quad (14)$$

El límite inferior considera que, para obtener una generación uniforme de RSU durante la semana se tendrán que realizar las operaciones de recolección cada 2,33 días, lo cual es difícil de programar en la práctica. Por otro lado, la parte entera del límite superior demuestra que el número máximo de días sin servicio de recolección, es de 3. Como se puede observar, el intervalo tiene en cuenta dos extremos temporales en las cantidades generadas y recolectadas de RSU según sea la frecuencia en la recolección. Finalmente la magnitud del $Cpdh$ se ha tomado como el promedio entre el límite inferior y la parte entera del límite superior.

Fracción reciclable: Coeficiente punta diario de distribución heterogénea, $Cpdh$, para una frecuencia de recolección de la fracción reciclable de dos días por semana:

$$Cpdh = \left[\frac{7}{n}; 1 + \frac{7}{n} \right] = \left[\frac{7}{2}; 1 + \frac{7}{2} \right] = [3,5; 4] \Rightarrow Cpdh = \frac{3,5 + 4}{2} = 3,75 \quad (15)$$

b. Producción de diseño, Prd.

Fracción resto:

$$Prd = PPC * Pob. * Cps * Cpdh * \%Resto = 0,85 * 200.000 * 1,5 * 2,67 * 0,7 = 476,6 \text{ Ton/d} \quad (16)$$

Fracción reciclable:

$$Prd = PPC * Pob. * Cps * Cpdh * \%Reciclable = 0,85 * 200.000 * 1,5 * 3,75 * 0,3 = 286,9 \text{ Ton/d} \quad (17)$$

4. Diseño de los sistemas para la prerrecogida (contenedores).

La capacidad de los contenedores de carga lateral a emplear para la fracción resto y reciclable será de 2.400 litros (Contenur, 2007); según el estudio de localización y desplazamiento para los usuarios del sistema (asumido). La densidad media de los residuos en el interior del contenedor será de 200 Kg/ m^3 (Pineda, 1998; U.S. EPA, 2000).

Fracción resto:

$$\text{Contenedores} = \frac{Prd}{\rho * V} = \frac{476,6 \text{ Ton/d}}{0,20 \text{ Ton/m}^3 * 2,40 \text{ m}^3} \cong 993 \text{ contenedores/d} \quad (18)$$

$$\text{Habitantes/contenedor} = \frac{200.000 \text{ hab.}}{993 \text{ cont.}} \cong 201 \quad (19)$$

Fracción reciclable:

$$\text{Contenedores} = \frac{Prd}{\rho * V} = \frac{286,9 \text{ Ton/d}}{0,20 \text{ Ton/m}^3 * 2,40 \text{ m}^3} \cong 598 \text{ contenedores/d} \quad (20)$$

$$\text{Habitantes/contenedor} = \frac{200.000 \text{ hab.}}{598 \text{ cont.}} \cong 334 \quad (21)$$

5. Diseño de los equipos para la recolección (CRC). Se utilizará un sistema de carga lateral mecanizada. La capacidad de la caja del CRC para la fracción resto y reciclable es de 24 yd^3 (18,3 m^3). La densidad de compactación del CRC será de 650 kg/m^3 (Búfalo, 2007; Fanalca, 2007).

a. Número de puntos de presentación atendidos por CRC.

Fracción resto y reciclable:

$$\text{Puntos/CRC} = \frac{V_c * \rho_c}{V * \rho} = \frac{18,3 \text{ m}^3 * 0,65 \text{ Ton/m}^3}{2,0 \text{ m}^3 * 0,20 \text{ Ton/m}^3} = 24,8 \cong 24 \quad (22)$$

b. Itinerario de la recogida por CRC.

Fracción resto y reciclable. Tiempo de toma de los contenedores: 70 segundos en promedio (UC-GIA, 1998); tiempo de transporte entre puntos de presentación: 80 segundos en promedio, independiente de la fracción (asumido); tiempo de transporte de ida y vuelta al sitio de disposición final: 1.5 horas (asumido); tiempo de descarga en el interior del sitio de disposición final: 25 minutos (asumido); y tiempo muerto: 5% (Tejero *et al.*, 2001). El tiempo total del itinerario de la recogida por CRC se calcula con la siguiente expresión:

$$T_{\text{itinerario}} = (24 * 0,020 \text{ h} + (24 - 1) * 0,022 \text{ h} + 1,5 \text{ h} + 0,42 \text{ h}) * (1 + 0,05) = 3,05 \text{ horas} \quad (23)$$

c. Número de itinerarios necesarios por día.

Fracción resto:

$$\text{Itinerarios} = \frac{\text{Prd}}{V_c * \rho_c} = \frac{476,6 \text{ Ton/d}}{18,3 \text{ m}^3 * 0,65 \text{ ton/m}^3} \cong 40 \quad (24)$$

Fracción reciclable:

$$\text{Itinerarios} = \frac{\text{Prd}}{V_c * \rho_c} = \frac{286,9 \text{ Ton/d}}{18,3 \text{ m}^3 * 0,65 \text{ ton/m}^3} \cong 24 \quad (25)$$

d. Número de viajes por jornada laboral.

Fracción resto y reciclable:

$$\text{Viajes} = \frac{JL}{T_{\text{itinerario}}} = \frac{8 \text{ horas}}{3,05 \text{ horas}} \cong 2,6 \quad (26)$$

e. Número total de camiones (CRC).

Fracción resto:

$$\text{CRC} = \frac{\text{Itinerarios}}{\text{Viajes}} = \frac{40}{2,6} \approx 16 + (\text{reserva}) \quad (27)$$

$$\text{Habitantes/CRC} = \frac{200.000 \text{ hab.}}{16 \text{ CRC}} \cong 12.500 \quad (28)$$

Fracción reciclable:

$$\text{CRC} = \frac{\text{Itinerarios}}{\text{Viajes}} = \frac{24}{2,6} \approx 10 + (\text{reserva}) \quad (29)$$

$$\text{Habitantes/CRC} = \frac{200.000 \text{ hab.}}{10 \text{ CRC}} \cong 20.000 \quad (30)$$

Conclusiones

El diseño de la recogida de RSU mediante la inclusión de los factores punta de generación permite considerar la variación temporal en las cantidades generadas y recolectadas de residuos en una localidad. Esta consideración temporal permitirá realizar diseños razonables que se ajusten a las tasas máximas de generación y recolección, de tal forma que prácticamente ningún día existan residuos fuera de los puntos de presentación (contenedores).

En el caso de que la producción semanal máxima sea recogida en siete días se obtendrá una cierta distribución heterogénea, que para la semana máxima puede llegar a producir una punta diaria entre 1,5-2,5, según sea el tamaño de la población. Este factor punta diario (*Cpd*) no es tenido en cuenta, ya que puede llevar a sobreestimaciones en la producción de diseño de los sistemas y equipos de la prerrecogida y recogida de RSU. De lo contrario se estará asumiendo que durante todos los días de la semana de máxima producción se están presentando puntas diarias (valores máximos) en la generación de residuos, lo cual es poco probable en la práctica.

Como la recogida normalmente no se realiza todos los días de la semana, hay que añadir un factor punta de distribución heterogénea provocado por la recogida (*Cpdh*). Los residuos recogidos varían en función del número de recogidas y de la distribución de estas a lo largo de la semana. El coeficiente punta diario de distribución heterogénea aumenta a medida que disminuye la frecuencia de recolección de los residuos. Su aumento se debe a que los contenedores permanecerán durante más tiempo, sin ser vaciados, en los puntos de presentación de residuos.

Las expresiones que incluyen los factores punta de generación para el cálculo de la producción de RSU solo pueden ser empleadas para el diseño de los sistemas y equipos de la recogida de residuos. Estas no representan un estimativo de la producción media diaria de residuos sólidos en una localidad. Para ello se debe emplear la expresión básica que incluye únicamente la producción *per cápita* y la población de diseño.

Para un buen diseño de la recogida de RSU no basta con la inclusión de los factores punta de generación. Se deben contemplar factores políticos como la reducción en origen, la legislación existente y las actitudes públicas; geográficos, como el crecimiento demográfico y clima; y los relacionados con el estilo de vida, como el nivel de desarrollo de la localidad (producto interno bruto, PIB), las variaciones estacionales y los periodos vacacionales.

Es necesario adelantar investigaciones que tengan por objeto la estimación de parámetros fundamentales para el diseño de la prerrecogida y recogida de RSU en nuestro país. Para el diseño es esencial obtener estimaciones acerca de la *PPC* y la composición física, y su evolución a lo largo del tiempo; de la variación mensual, semanal y diaria en las tasas de generación y recolección de residuos; de la densidad media de los residuos en el interior de los contenedores y camiones; y de los diferentes tiempos del itinerario de recogida según sea el sistema de recolección. Así se lograrán desarrollar diseños más confiables y ajustados a la realidad de nuestras localidades.

Finalmente, la metodología planteada puede ser utilizada como guía para la selección del equipamiento y tamaño de las unidades de gestión integral de los RSU.

Nomenclatura

FBS: *fixed box systems*.

SCF: sistemas de caja fija.

Cps: coeficiente punta semanal.

Cpd: coeficiente punta diario.

Cpdh: coeficiente punta diario de distribución heterogénea.

RSU: residuo sólido urbano.

GIRS: gestión integral de residuos sólidos.

RAS: Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico.

IRM: instalación de recuperación de materiales.

CRC: camión recolector compactador.

PPC: producción per cápita.

Bibliografía

- American Society for Testing and Materials., Standard Test Method for Determination of the Composition of Unprocessed Municipal Solid Waste., D5231-92, Philadelphia, American Book of Standard, 1992.
- Clark, M., Gallean, I., Analysis of Solid Waste Management Operations in Cleveland, Ohio: A Case Study., *Interfaces*, Vol. 6, N° 1, 1975, pp. 32-42.
- Cointreau, S., Gunnerson, G., Huls, J. y Seldman, N., Recycling from Municipal Refuse: A State of the Art Review and Annotated Bibliography., Washington D.C., Integrated Resource Recovery, World Bank, Technical Paper No. 30, United Nations Development Program, 1985.
- Collazos, H., Diseño y Operación de Rellenos Sanitarios., Bogotá D.C., Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, 2005, pp. 23-49.
- Contenur., Catalogo de Productos: Contenedores., Madrid, España, 2007.
- Contraloría General de la República., Auditoria Especial al Manejo de los Residuos Sólidos., Bogotá D.C., Colombia, 2005.
- CORANTIOQUIA., Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos Regional del Valle de Aburrá., Medellín, Resumen ejecutivo convenio N° 325, Entre Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA)-Universidad de Antioquia-Asociación de Ingenieros Sanitarios y Ambientales de Antioquia (AINSA), 2006, pp. 10-14.
- Fanalca, S.A., Catalogo de Productos: Cajas Compactadoras., Cali, División Ambiental, Colombia, 2007.
- Ferrer, J., Gallardo, A., Vidal, M., Belles, M., Ramos, J., Metodología para la Generación de Alternativas a la Gestión de Residuos Sólidos Urbanos. Aplicación a la Ciudad de Castellón., Castellón, Fundación Dávalos-Fletcher, 2002.
- Foster, W., Ingeniería Urbana y Servicios Técnicos Municipales., Madrid, Instituto de Estudios de la Administración Local, 1979, pp. 10-145.
- Grupo de Ingeniería Ambiental UC-GIA., Diseño de Programas de Gestión de los Residuos Sólidos en Cantabria., Convenio de colaboración entre la Universidad de Cantabria y la Diputación Regional de Cantabria, Santander, España, 1998.
- Hontoria, E., Zamorano, M., Fundamento del Manejo de los Residuos Urbanos., Madrid, Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Colección Senior 24, 2000, pp. 223-268.
- Industrias Búfalo LTDA., Catalogo de Productos: Compactadores de Basura., Bogotá D.C., Colombia, 2007.
- Jaramillo, J., Gestión Integral de Residuos Sólidos Municipales-GIRSM., Medellín, Seminario Internacional: Gestión Integral de Residuos Sólidos y Peligrosos Siglo XXI, 1999.
- Karadimas, V., Kouzas, G., Anagnostopoulos, I., Loumos, V., Urban Solid Waste Collection and Routing: The Ant Colony Strategic Approach., *International Journal of Simulation: Systems, Science & Technology*, Vol. 6, No. 12-13, 2007, pp. 45-53.
- Karagiannidis, A., Xirogiannopoulou, A., Perkoulidis, G., Moussiopoulos, N., Assessing the Collection of Urban Solid Wastes: a Step towards Municipality Benchmarking., *Water, Air & Soil Pollution*, Vol. 4, No. 4-5, 2004, pp. 397-409.
- Lobo, A., Producción y Caracterización de Residuos y su Evolución Futura., Curso de Medio Ambiente, Suances, Universidad de Cantabria, España, 2000.
- López, J., Eliminación de Residuos Sólidos Urbanos., Barcelona, Editores Técnicos Asociados, 1980, pp. 12-87.
- Ministerio de Desarrollo Económico., Reglamento Técnico para el Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico., Colombia, 2000.
- Ministerio del Medio Ambiente., Política para la Gestión de Residuos., Bogotá D.C., Departamento de Planeación Nacional, Colombia, 1998.
- Mosler, H., Drescher, S., Zurbrügg, C., Caballero, T., Guzmán, O., Formulating Waste Management Strategies Based on Waste Management Practices of Households in Santiago de Cuba., *Habitat International*, Vol. 30, No. 4, 2006, pp. 849-862.
- OPS, Organización Panamericana de la Salud., Análisis Sectorial de Residuos Sólidos en Colombia. Plan Regional de Inversiones en Ambiente y Salud., Series análisis sectoriales N. 8 BIRF, Programa de Gestión Urbana, Bogotá D.C., Ministerio de Salud de Colombia, Ministerio de Medio Ambiente de Colombia, 1996.
- Pineda, S., Manejo y Disposición de Residuos Sólidos Urbanos., Bogotá D.C., Acodal, 1998, pp. 55-73.
- Ronen, R., Kellerman, A., Lapidot, M., Improvement of a Solid Waste Collection System: The Case of Givatayim, Israel., *Applied Geography*, Vol. 3, No. 2, 1983, pp. 133-144.
- Salvato, J., Nemerow, N., Agardy, F., *Environmental Engineering.*, New York, Jon Wiley and Sons, 2003, pp. 755-885.
- Shuster, K. A., Schur, D. A., Heuristic Routing for Solid Waste Collection Vehicles., Washington D.C., Publication SW-113, U.S. EPA, 1974.
- Smith, K., Solid Waste Collection Systems in Developing Urban Areas of South Africa: An Overview and Case Study., *Waste Management & Research*, Vol. 15, No. 5, 1997, pp. 477-494.
- Sufian, M., Bala, B., Modeling of Urban Solid Waste Management System: The Case of Dhaka City., *Waste Management*, Vol. 27, No. 7, 2007, pp. 858-868.
- Tchobanoglous, G., Theisen, H., Vigil, S., *Gestión Integral de Residuos Sólidos.*, Madrid, McGraw-Hill, 1994, pp. 143-278.
- Tejero, I., Suárez, J., Jacóme, A., Temprano, J., *Introducción a la Ingeniería Sanitaria y Ambiental.*, Santander, Universidad de Cantabria-Universidade da Coruña, España, 2001. pp. T4/1 - T6/13.
- U.S. EPA., *Municipal Solid Waste Generation, Recycling and Disposal in the United States: Facts and Figures for 1998.*, Washington D.C., EPA 530-F-00-024, 2000.
- UESP., *Plan maestro de residuos sólidos-PMIRS. Plan de Gestión Integral de Residuos Sólidos-PGIRS.*, Bogotá D.C., Resolución UESP No. 132, 2004.