
CAPITULO 8

Recolección de residuos sólidos

La recolección de residuos sólidos, no seleccionados y separados, en una zona urbana es difícil y compleja, ya que la generación de residuos sólidos comerciales-industriales y domésticos se produce en cada casa, en cada bloque de viviendas, y en cada instalación comercial e industrial, así como en las calles, en los parques, e incluso en zonas vacías. El siempre creciente desarrollo de las afueras de las ciudades a lo largo del país ha complicado todavía más la tarea de recolección.

Mientras las formas de generar residuos se vuelven más difusas y se incrementa la cantidad total de residuos, la logística de recolección se vuelve más compleja. Aunque estos problemas siempre han existido en algún grado, actualmente han llegado a ser críticos por los altos costes en el combustible y en la mano de obra. De la cantidad total del dinero gastado en la recolección, el transporte y la evacuación de residuos en 1992, aproximadamente se gastó del 50 al 70 por 100 en la fase de recolección. Este dato es importante porque una pequeña mejora en la operación de recolección puede provocar un ahorro significativo en el coste global.

La operación de recolección se expone en este Capítulo en base a cuatro aspectos: 1) tipos de servicios de recolección proporcionados; 2) tipos de sistemas de recolección y algunos equipamientos utilizados en la actualidad, así como las necesidades asociadas de mano de obra; 3) análisis de los sistemas de recolección, incluyendo las relaciones de componentes que se pueden utilizar para cuantificar las operaciones de recolección, y 4) metodología general utilizada en la puesta en marcha de itinerarios de recolección.

8.1 RECOLECCION DE RESIDUOS

El término *recolección*, como se resaltó en el Capítulo 1, incluye no solamente la recolección o toma de los residuos sólidos de diversos orígenes, sino también el transporte de estos residuos hasta el lugar donde los vehículos de recolección se vacían. La descarga del vehículo de recolección también se considera como parte de la operación de recolección. Mientras las actividades asociadas al transporte y la descarga son similares para la mayoría de los sistemas de recolección, la recolección o toma de los residuos sólidos variará según las características de las instalaciones, actividades o localizaciones donde se generan los residuos (ver Tabla 3.1), y los métodos utilizados para el almacenamiento *in situ* de los residuos acumulados entre recolecciones. Los principales tipos de servicios de recolección utilizados actualmente para los residuos, no seleccionados y separados, se presentan a continuación.

Recolección de residuos no seleccionados

La recolección de residuos de viviendas aisladas, de bloques de viviendas de mediana altura y de bloques de viviendas elevados, y de instalaciones comerciales/industriales se presenta a continuación. La recolección de residuos separados en origen se discute más adelante.

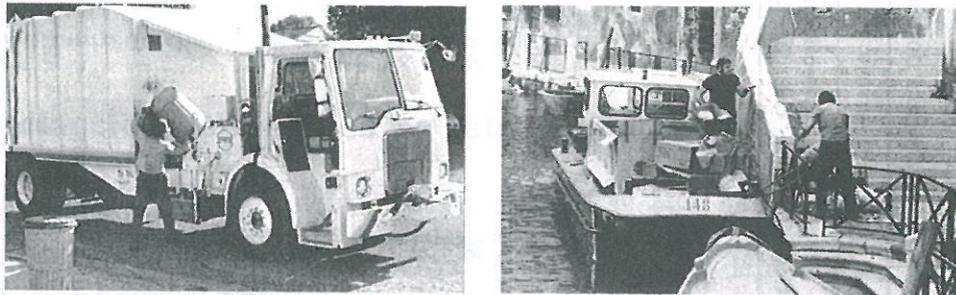
De viviendas aisladas de baja altura. Los tipos más comunes de servicios de recolección domésticos para las viviendas aisladas de baja altura incluyen: 1) acera, 2) callejón, 3) sacar-devolver, y 4) sacar. Cuando se utiliza el servicio en acera, el propietario de la casa es el responsable de colocar los contenedores que hay que vaciar en la acera el día de recolección, y de devolver los contenedores vacíos a su lugar de almacenamiento hasta la siguiente recolección. Cuando los callejones forman una parte básica del mapa de una ciudad o zona residencial, es muy común el almacenamiento en callejón de los contenedores de residuos sólidos. En el servicio sacar-devolver, los contenedores son sacados de la propiedad y devueltos después de ser vaciados por operarios extras que trabajan conjuntamente con los operarios responsables de la carga del vehículo de recolección. El servicio de sacar es esencialmente el mismo que el de sacar-devolver, excepto que el propietario de la casa es el responsable de devolver los contenedores a su lugar de almacenamiento. Se comparan estos servicios en la Tabla 8.1.

Los métodos manuales utilizados para la recolección de residuos domésticos incluyen: 1) el levantamiento directo y el porte de los contenedores cargados hasta el vehículo de recolección para su vaciado, 2) el deslizamiento de los contenedores cargados sobre sus ruedas hasta el vehículo de recolección para su vaciado, y 3) el uso de pequeños montacargas para llevar los contenedores cargados al vehículo de recolección. Los grandes contenedores, en los que se vaciaban los contenedores más pequeños antes de llevarlos al vehículo de recolección, todavía se usan en algunas comunidades. Para la recolección

TABLA 8.1
Comparaciones entre servicios de recolección de RSU domésticos

Consideraciones	Tipo de servicio				
	Acera (mecanizado)	Callejón	Disposición con retirada	Disposición sin retirada	Servicio de patio
Requiere la cooperación de los residentes:					
Para llevar contenedores llenos	Sí	Opcional	No	No	No
Para llevar contenedores vacíos	Sí	Opcional	No	Sí	No
Requiere servicio regular para la cooperación de residentes	Sí	No	No	Sí	No
Estéticamente pobre:					
Problemas de vertido y basura	Altos	Altos	Bajos	Altos	Bajos
Contenedores visibles	Sí	No	No	Sí	No
Atractivo para animales errantes	Sí	Más alto	No	No	No
Propenso al vuelco	Sí	Sí	No	Sí	No
Número de personas por equipo	2	1	3	3	3
Típico	1-3	1-3	3-7	1-5	3-5
Gama	Bajo	Bajo	Alto	Mediano	Mediano
Tiempo de equipo	Baja	Baja	Alta	Mediana	Alta
Tasa de accidentes debidos al levantamiento y transporte	Bajas	Bajas	Altas	Bajas	Altas
Quejas por intrusión	Necesita contenedores estandarizados	Necesita callejones y vehículos que puedan maniobrar en ellos; menos propenso a estancarse el tráfico; alta tasa de depreciación del vehículo y contenedor			Necesita un carrito con ruedas para transportar barriles llenos o el uso de una arpillera de carga o un cubo portátil; funciona mejor con camino particular
Consideraciones especiales					
Coste debido a necesidades de tiempo y tamaño	Bajo	Bajo	Alto	Mediano	Mediano

en acera, cuando se utilizan vehículos de recolección con una baja altura de carga, los operarios de recolección transfieren los residuos directamente desde los contenedores en que son almacenados o llevados al vehículo de recolección (ver Figura 8.1). En otros casos los vehículos de recolección son equipados con contenedores auxiliares en los que se vacían los residuos. Más tarde se vacían gida por medios mecánicos. Todavía otra variante implica el uso de pequeños vehículos satélite. Los residuos se vacían en el contenedor grande llevado por un vehículo satélite. Cuando se ha cargado el contenedor, el vehículo satélite se conduce hasta el vehículo de recolección, donde se vacía el contenedor en el camión por medios mecánicos (ver Figura 8.2).

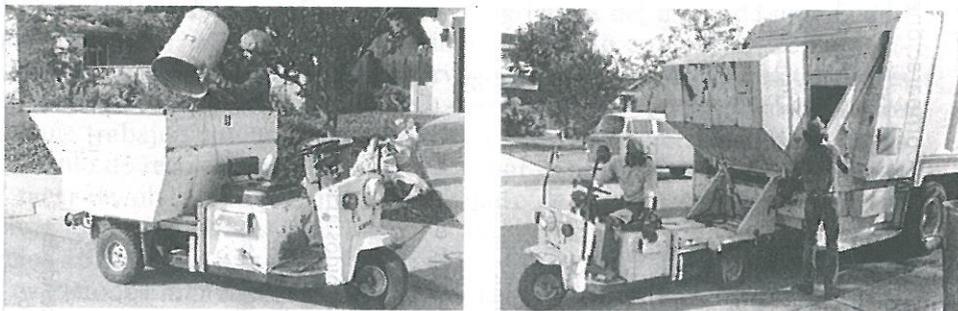


(a)

(b)

FIGURA 8.1

Recolección de residuos puestos en la acera por los residentes: (a) Davis, California, y (b) Venecia, Italia.



(a)

(b)

FIGURA 8.2

Sistema de recolección con vehículo satélite: (a) carga del vehículo satélite equipado con contenedor de 1,5 m³ (hay que destacar que en condiciones de mucho viento, el vuelo de los residuos constituye un problema) y (b) descarga mecánica del contenido de un contenedor de un vehículo satélite.



(a)

(b)

FIGURA 8.3

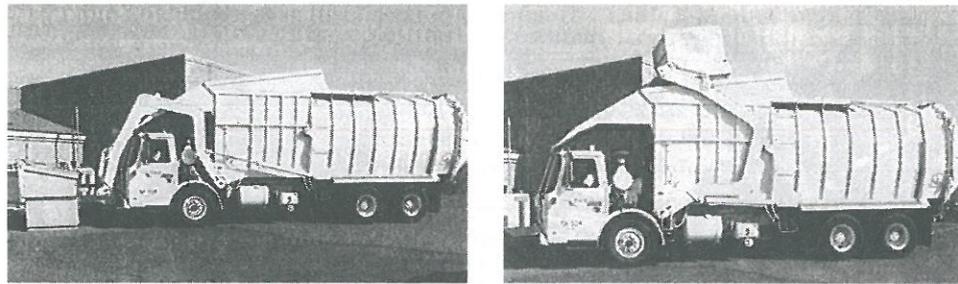
Ejemplo típico de vehículo de recolección cargado mecánicamente utilizado para la recolección de residuos domésticos: (a) recolección de residuos domésticos colocados en grandes contenedores de 340 l con mecanismo articulado de toma y (b) primer plano del mecanismo de toma. Los contenedores son llevados a la acera por el residente.

Cuando se usan vehículos de recolección cargados mecánicamente, el contenedor utilizado para el almacenamiento *in situ* de los residuos se debe llevar a la acera o a otro lugar de recolección adecuado. Normalmente, se utilizan contenedores de 340 l conjuntamente con vehículos mecanizados de recolección (ver Figura 8.3).

De bloques de viviendas de baja y mediana altura. El servicio de recolección en acera es común para la mayoría de los bloques de viviendas de baja y mediana altura. Normalmente la plantilla de mantenimiento es la responsable del transporte de los contenedores a la calle para su recolección en acera mediante medios manuales o mecánicos. Cuando se utilizan grandes contenedores, se vacían los contenedores mecánicamente utilizando vehículos de recolección equipados con mecanismos de descarga.

De bloques de viviendas elevados. Normalmente se utilizan grandes contenedores para recoger residuos de bloques de viviendas elevados. Según el tamaño y tipo de contenedor utilizado, se pueden vaciar los contenedores mecánicamente utilizando vehículos de recolección equipados con mecanismos de descarga (ver Figura 8.4), o los contenedores cargados pueden ser transportados a otro lugar (por ejemplo, una instalación de recuperación de materiales), donde se descargan los contenidos (ver Figura 8.5).

De instalaciones comerciales-industriales. Para recolectar los residuos de instalaciones comerciales e industriales se utilizan medios manuales y mecánicos. Para evitar la congestión de tráfico durante el día, en muchas grandes ciudades se recogen por la noche y por la mañana muy temprano los residuos sólidos de establecimientos comerciales. Cuando se utiliza la recolección manual, los residuos de los establecimientos comerciales son colocados en bolsas de



(a) (b)

FIGURA 8.4

Vehículo autocargador equipado con compactadora interna: (a) acercándose al contenedor a vaciar, y (b) vaciando el contenido del contenedor.

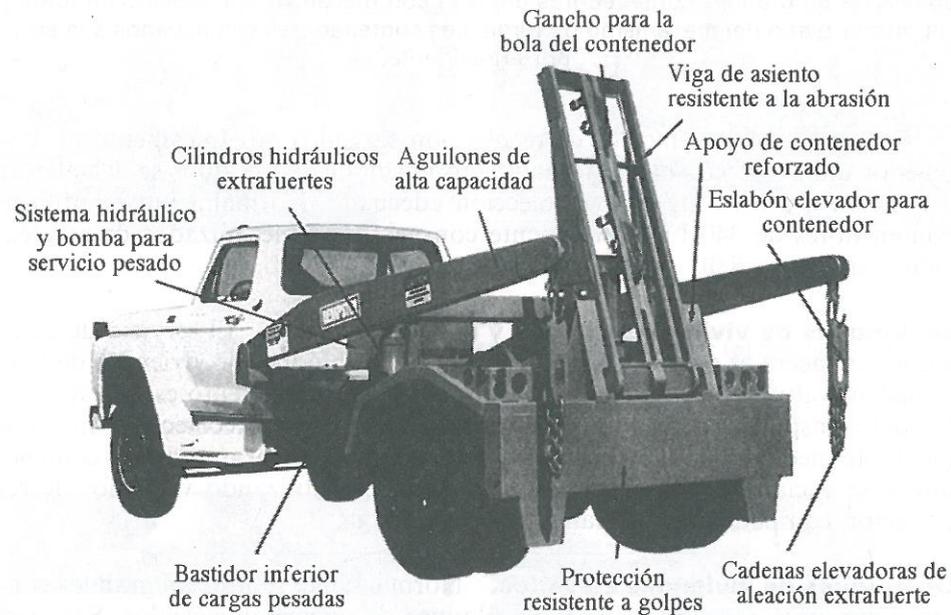


FIGURA 8.5

Vehículo de recolección utilizado para transportar y vaciar grandes contenedores (1,5 a 10 m³). Mecanismo de levantamiento y descarga de contenedores acoplado al esqueleto del camión. (Cortesía de Dempster Dumpster Systems.)

plástico, cajas de cartón, u otros contenedores desechables, que son colocados en la acera para su recolección. La recolección de residuos normalmente se lleva a cabo con un equipo de tres o, en algunos casos, cuatro operarios, conformado por un conductor y dos o tres recolectores, que cargan los residuos desde la acera al vehículo de recolección. En la mayoría de las operaciones de recolección durante horas fuera del horario normal, el conductor se queda en el vehículo por razones de seguridad.

Si la congestión no es un problema importante y hay espacio disponible para almacenar contenedores, el servicio de recolección proporcionado a las instalaciones comerciales e industriales se concentra en el uso de contenedores móviles (ver Figura 8.6), contenedores que se pueden acoplar a grandes compactadoras estacionarias (ver Figura 8.7), y contenedores abiertos de gran capacidad (ver Figura 8.8). De nuevo, según el tipo y tamaño de contenedor utilizado, se puede vaciar el contenido de los contenedores mecánicamente o transportar los contenedores cargados a otro lugar, donde se descarga el contenido. Para minimizar las dificultades originadas por la congestión del tráfico, también se puede llevar a cabo la recolección mecanizada durante la noche, con un conductor y ayudante.



(a) (b)

FIGURA 8.6

Secuencia de vaciado para contenedores utilizados en un complejo comercial: (a) los contenedores cargados son llevados y acoplados al vehículo de recolección, y (b) los contenidos del contenedor son vaciados mecánicamente.

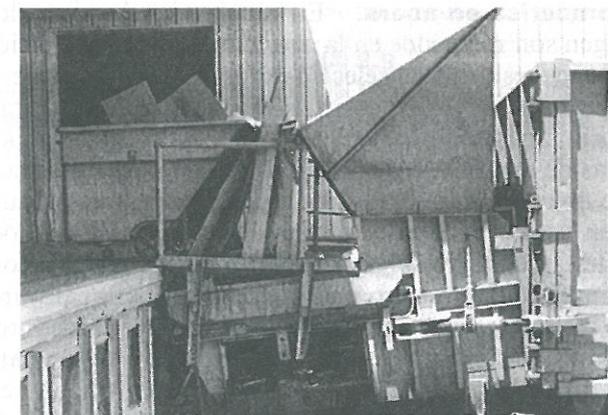


FIGURA 8.7

Compactadora estacionaria utilizada conjuntamente con contenedor grande para la recolección de residuos de establecimientos comerciales.

Recolección de residuos separados en origen

Los materiales de residuos que han sido separados en origen tienen que agruparse antes de poder ser reciclados. Actualmente, los métodos principalmente utilizados para la recolección de estos materiales incluyen la recolección en acera utilizando vehículos de recolección convencionales y otros especialmente diseñados, recolección en acera incidental por parte de organizaciones de caridad, y la entrega por parte de los ciudadanos a centros de recolección selectiva y de recompra. La recolección en acera de residuos separados en origen se argumenta a continuación. En el Capítulo 9 se trata la recuperación de materiales en centros de recolección selectiva y de recompra.



FIGURA 8.8

Grandes contenedores abiertos utilizados para la recolección de residuos de establecimientos comerciales.

Recolección doméstica en acera. En un sistema de acera, los reciclables separados en origen son recogidos en la acera, callejón o instalación comercial, separadamente de los residuos no seleccionados. Como los residentes y comercios no tienen que transportar los reciclables más allá de la acera, los programas de acera normalmente tienen una tasa de participación mucho más alta que los programas de centros de recolección selectiva. Los programas de acera varían mucho de una comunidad a otra. Algunos programas requieren que los residentes separen varios materiales distintos (por ejemplo, periódicos, plásticos, vidrio, metales) que luego son almacenados en sus propios contenedores y recogidos por separado. Otros programas utilizan solamente un contenedor para almacenar reciclables no seleccionados, o dos contenedores, uno para papel y el otro para reciclables «pesados», tales como vidrio y latas de aluminio y hojalata. Obviamente, el método utilizado para recoger residuos separados en origen afectará directamente al diseño y forma de las instalaciones de separación y procesamiento. Los tipos principales de vehículos utilizados para la recolección de los residuos separados son: 1) vehículos de recolección estandarizados y 2) vehículos de recolección especializados, incluyendo ca-

miones de reciclaje con caja cerrada, remolques de reciclaje, remolques de plataforma modificados, camiones de reciclaje con caja abierta, y remolques compartimentarizados. En Figura 8.9 se muestran cuatro vehículos frecuentemente utilizados para la recolección de residuos separados en origen. En la Tabla 8.2 se repasan las características de estos vehículos especializados. En el Ejemplo 8.1 se ilustra la determinación de la cantidad de cada residuo que hay que recoger.

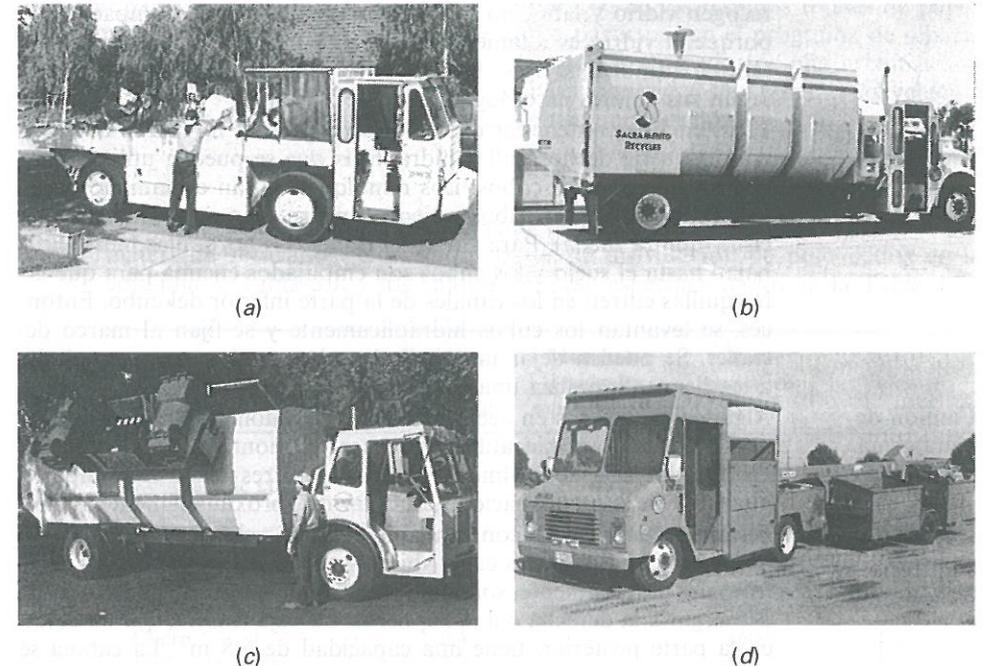


FIGURA 8.9

Vehículos especialmente diseñados para la recolección de residuos separados en origen: (a) caja abierta cargada manualmente; (b) caja abierta cargada manualmente, vaciada mecánicamente; (c) contenedores vaciados mecánicamente, y (d) sistema de contenedores móviles.

TABLA 8.2

Características de los vehículos utilizados para la recolección de residuos separados en origen^a

Tipo	Comentario
Camiones compactadores estándar	Los compactadores utilizados para la recolección de residuos no seleccionados se pueden utilizar también para la recolección de los reciclables. Muchas comunidades utilizan los camiones compactado-

TABLA 8.2 (Cont.)

Tipo	Comentario
	res en sus programas de reciclaje. Los compactadores de carga trasera han sido utilizados para periódicos, cartón y revistas, con remolques acoplados para el vidrio y las latas. Se han usado cargadores frontales para trabajar con grandes contenedores de periódicos recuperados en bloques de viviendas. Algunas ciudades utilizan camiones compactadores de carga trasera y lateral para recoger periódicos, una semana, y vidrio y latas, la siguiente. Donde se recogen vidrio y latas, no se utiliza el mecanismo de compactación, porque el vidrio es altamente abrasivo y dañaría la placa compactadora. También, si no se rompe el vidrio es más fácil de seleccionar según sus colores en el lugar de procesamiento.
Sistema de contenedor móvil	El sistema de contenedor móvil es esencialmente un marco de acero con una serie de horquillas hidráulicas que se pueden utilizar para transportar grandes cubos. Los remolques varían en tamaño desde tres cubos hasta seis cubos y tienen un tiro bajo de estilo cuello de cisne (quinta rueda). Para cargar el trailer, las horquillas hidráulicas bajan hasta el suelo y los cubos son empujados encima para que las horquillas entren en los canales de la parte inferior del cubo. Entonces, se levantan los cubos hidráulicamente y se fijan al marco del trailer. Se pueden dejar una serie de cubos vacíos para reemplazar a los llenos. Se utiliza una camioneta para tirar del trailer.
Camión de plataforma modificado	Algunos programas en acera utilizan un camión de plataforma normal con una caja hidráulica de descarga montada en la base del camión. La caja normalmente se divide en tres o cuatro compartimentos y tiene una capacidad estándar de aproximadamente 10 m ³ .
Camión de reciclaje con caja abierta	El camión de reciclaje con caja abierta es un vehículo especialmente diseñado, con dos o tres cajas abiertas autodescargadoras. Las cajas frontales normalmente son de 3-4 m ³ y se pueden modelar para descargar a la derecha o a la izquierda. La caja trasera, que descarga en la parte posterior, tiene una capacidad de 6-8 m ³ . La cabina se puede diseñar para la conducción de pie en el lado derecho, permitiendo que el conductor controle la función de carga.
Camión de reciclaje con caja cerrada	Este camión consiste en una caja de acero cerrada instalada sobre un chasis de camión bajo y una cabina de entrada baja, con controles duales a derecha e izquierda (que permite su operación por una persona). En la caja hay divisores ajustables con bisagras, que se pueden utilizar para crear entre dos y cuatro compartimentos para materiales diferentes. Se abren uno o los dos lados para la carga manual. Las chapas desmontables de aluminio laterales contienen la carga mientras sube el nivel del material. La capacidad global del camión puede variar de 18-23 m ³ , aunque la capacidad operativa con carga manual es de 15 a 19 m ³ . El camión está equipado con un montacargas telescópico montado frontalmente y una bisagra de caja trasera para la descarga. Cada compartimento se vacía por separado abriendo la puerta trasera y la divisoria apropiada, e inclinando la caja.

^a Adaptado de Referencia 1.

Ejemplo 8.1. Separación doméstica y recolección en acera de reciclables. Una comunidad está comprando vehículos para la recolección en acera de residuos separados en origen. En cada vivienda se van a proporcionar tres contenedores de reciclaje, y se va a pedir a los residentes que separen periódicos y cartón, plásticos y vidrio, y latas de aluminio y hojalata. El residente tiene que colocar los materiales separados en los contenedores apropiados y después trasladar los contenedores de reciclaje a la acera una vez a la semana para su recolección con vehículos especiales de reciclaje. Estimar la capacidad volumétrica relativa requerida para cada material en los vehículos de recolección de reciclaje. Suponer que el 80 por 100 del material reciclable será separado y que el papel de periódico representa el 20 por 100 de los residuos totales de papel. Se estima que el número de viviendas que van a participar en el programa de separación es el 60 por 100. Si se van a recoger los residuos separados de una urbanización de 1.200 viviendas, determinar el número de viajes requeridos si el tamaño del vehículo de recolección es de 15 m³. Suponer 3,5 residentes por vivienda.

Solución

1. Construir una tabla de cálculos para determinar el volumen relativo de los materiales reciclados. Utilizar los datos de distribución de peso dados en la columna 4, Tabla 3.7, y los valores del peso específico dados en la Tabla 4.1.

Componente	Residuos sólidos totales, kg	Materiales residuales separados, kg	Peso específico, kg/m ³	Volumen, m ³
Orgánicos				
Residuos de comida	8,0	—	288,3	—
Papel	35,8	5,7 ^a	89,7	0,064
Cartón	6,4	5,1	49,7	0,103
Plásticos	6,9	5,5	65,7	0,084
Textiles	1,8	—	65,7	—
Goma	0,4	—	129,8	—
Cuero	0,4	—	160,2	—
Podas de jardín	17,3	—	107,3	—
Madera	1,8	—	237,1	—
Inorgánicos				
Vidrio	9,1	7,3	195,4	0,037
Latas de hojalata	5,8	4,6	89,7	0,051
Aluminio	0,6	0,5	160,2	0,003
Otros metales	3,0	—	320,4	—
Suciedad, cenizas, etc.	2,7	—	480,6	—
Total	100,0	28,7		0,342

^a 5,7 kg = [(35,8 kg · 0,20) · 0,8].

2. Determinar el volumen relativo de los materiales reciclados.
 - a) El volumen en cada categoría es:
 - i. Periódicos + cartón = 0,064 + 0,103 = 0,167 m³
 - ii. Plásticos + Vidrio = 0,084 + 0,037 = 0,121 m³
 - iii. Aluminio y latas de hojalata = 0,003 + 0,051 = 0,054 m³
 - b) Los volúmenes relativos de los residuos más las latas de hojalata y aluminio son:

- i. Periódicos + cartón = 3,1 (=0,167 m³/0,054 m³)
 - ii. Plásticos + vidrio = 2,2 (=0,121 m³/0,054 m³)
 - iii. Aluminio y latas de hojalata = 1,0
- c) Por lo tanto, si se utiliza un vehículo de recolección de 12 m³, 5,9 m³ [(0,167/0,342) · 12] de la capacidad sería para periódicos y cartón, 4,3 m³ para plásticos y vidrio y 1,8 m³ para latas de hojalata y aluminio.
3. Determinar el número de viajes necesarios para recoger los materiales separados.
- a) Estimar la tasa semanal de producción de residuos sólidos utilizando los datos de la Tabla 6.3.

Producción de residuos sólidos, kg/semana =

$$= 3,5 \text{ personas} \cdot 7 \text{ días/semana} \cdot 1,73 \text{ kg/persona} \cdot \text{día} = 42,4 \text{ kg/semana}$$

- b) Estimar la cantidad total semanal de periódicos y cartón separados.
- i. Periódicos separados,

$$\text{kg/semana} = 42,4 \text{ kg/semana} \cdot (5,7/100) = 2,4 \text{ kg/semana}$$

- ii. Cartón separado,

$$\text{kg/semana} = 42,4 \text{ kg/semana} \cdot (5,1/100) = 2,2 \text{ kg/semana}$$

- c) Estimar el volumen total semanal de periódicos y cartón separados.
- i. Periódicos separados,

$$\text{m}^3/\text{semana} = (2,4 \text{ kg/semana}) / (89,7 \text{ kg/m}^3) = 0,027 \text{ m}^3/\text{semana}$$

- ii. Cartón separado,

$$\text{m}^3/\text{semana} = (2,2 \text{ kg/semana}) / (49,7 \text{ kg/m}^3) = 0,044 \text{ m}^3/\text{semana}$$

- d) Estimar el número total de viajes de recolección semanales.

$$\begin{aligned} \text{Número de viajes} &= [(0,027 + 0,044) \text{ m}^3/\text{semana} \cdot \text{vivienda}] \cdot 1.200 \text{ viviendas} \\ &\cdot 0,60 \text{ (tasa de participación porcentual)} / 5,9 \text{ m}^3/\text{viaje} = \\ &= 8,67 \text{ viajes/semana; es decir, 9 viajes/semana} \end{aligned}$$

Comentario. Aunque los números en este ejemplo pueden cambiar, la aproximación es válida para cualquier operación de recolección. Cuando se aplica tal análisis, es importante preparar un análisis de sensibilidad para valorar cómo varían los volúmenes relativos cuando cambian las características de los residuos y se imponen nuevas normativas.

Instalaciones comerciales. Normalmente los materiales separados en origen de los establecimientos comerciales son recogidos por transportistas privados. En muchos casos, los transportistas tienen contratos con los establecimientos para el material separado. Los residuos que hay que reciclar son almacenados en contenedores distintos. En muchas ciudades, el cartón se embala y se deja en la acera, donde se recoge por separado. En grandes instalaciones comerciales se puede utilizar equipo de embalaje para el papel y cartón, y prensas para las latas de aluminio. Los RSU no seleccionados, además de los materiales separados, normalmente son recogidos por transportistas privados o por operarios municipales, cuando la ciudad realiza el servicio de recolección.

8.2 TIPOS DE SISTEMAS DE RECOLECCIÓN, EQUIPAMIENTO Y NECESIDADES DE PERSONAL

Durante los últimos diez años se han utilizado una amplia variedad de sistemas y equipamientos para la recolección de residuos sólidos. Estos sistemas pueden clasificarse desde varios puntos de vista, tales como el modo de operación, el equipamiento utilizado, y los tipos de residuos recogidos. En este texto, se han clasificado los sistemas de recolección según su modo de operación en dos categorías: 1) sistemas de contenedor (SC) y 2) sistemas de caja fija (SCF) [4]. En el primero, los contenedores utilizados para el almacenamiento de residuos son transportados al lugar de evacuación, vaciados, y devueltos a su localización original o a otra localización. En el segundo, los contenedores utilizados para el almacenamiento de residuos se quedan en el punto de generación, excepto cuando son llevados a la acera o a otro lugar para su vaciado. En esta sección se explican estos dos tipos de sistemas de recolección y las correspondientes necesidades de personal.

Sistemas de contenedor

Los sistemas de contenedor son idóneos para la recolección de residuos procedentes de centros con una alta tasa de generación, porque se utilizan contenedores relativamente grandes (ver Tabla 8.3). El uso de grandes contenedores reduce el tiempo de manipulación, así como las desagradables acumulaciones y condiciones poco sanitarias asociadas al uso de numerosos contenedores más pequeños. Otra ventaja de los sistemas de contenedor es su flexibilidad: hay contenedores disponibles en muchos tamaños y formas diferentes para la recolección de todo tipo de residuos.

Como los contenedores utilizados en este sistema normalmente hay que llenarlos manualmente, el uso de contenedores muy grandes a menudo conduce a la utilización baja de su volumen, si no se proporcionan ayudas para la carga, tales como plataformas y rampas. En este contexto, la utilización del contenedor se define como la fracción del volumen total del contenedor realmente ocupada por residuos.

Mientras los sistemas de contenedor tienen la ventaja de necesitar solamente un camión y un conductor para cumplir el ciclo de la recolección, cada contenedor tomado requiere un viaje de ida y vuelta al lugar de evacuación (u otro punto de transferencia). Por lo tanto, el tamaño y la utilización del contenedor son de gran importancia económica. Es más, cuando hay que recoger residuos fácilmente compresibles y transportarlos a largas distancias, las ventajas económicas de la compactación son claras.

Hay tres clases principales de sistemas de contenedor: 1) camión elevador-contenedor, 2) camión volquete, y 3) contenedor remolque. En la Tabla 8.4 se presentan datos típicos sobre los vehículos de recolección utilizados con estos sistemas. Los datos de coste para estos vehículos se presentan en el Apéndice E.

Sistemas con camión elevacontenedor. En el pasado, los camiones elevacontenedores se utilizaban ampliamente con contenedores que variaban en tamaño desde 1,5 a 10 m³ (ver Figura 8.5). Sin embargo, con la llegada de vehículos de recolección de gran capacidad y cargados mecánicamente, este sistema parece aplicarse solamente en algunos casos limitados. Los más importantes son los siguientes:

1. Para la recolección de residuos por parte de un recolector que opera en un área pequeña y recoge solamente en unos pocos puntos de toma donde se generan una cantidad considerable de residuos. Generalmente, para tales operaciones no se puede justificar económicamente la compra de un equipo de recolección moderno y más eficaz.
2. Para la recolección de artículos voluminosos y residuos industriales, tales como chatarra y escombros de construcción, ya que no son aptos para la recolección con vehículos de compactación.

Sistemas de contenedor camión volquete. Los sistemas que utilizan grandes contenedores cargados al camión volquete (ver Figura 8.10) son idóneos para la recolección de todos los tipos de residuos sólidos y desechos en localizaciones donde las tasas de generación justifiquen el uso de grandes contenedores. Como se resalta en la Tabla 8.3, hay disponibles varios tipos de contenedores grandes para ser usados con los vehículos de recolección camión volquete. Se utilizan contenedores abiertos normalmente en almacenes y en lugares de construcción (ver Figura 8.11). Los grandes contenedores utilizados

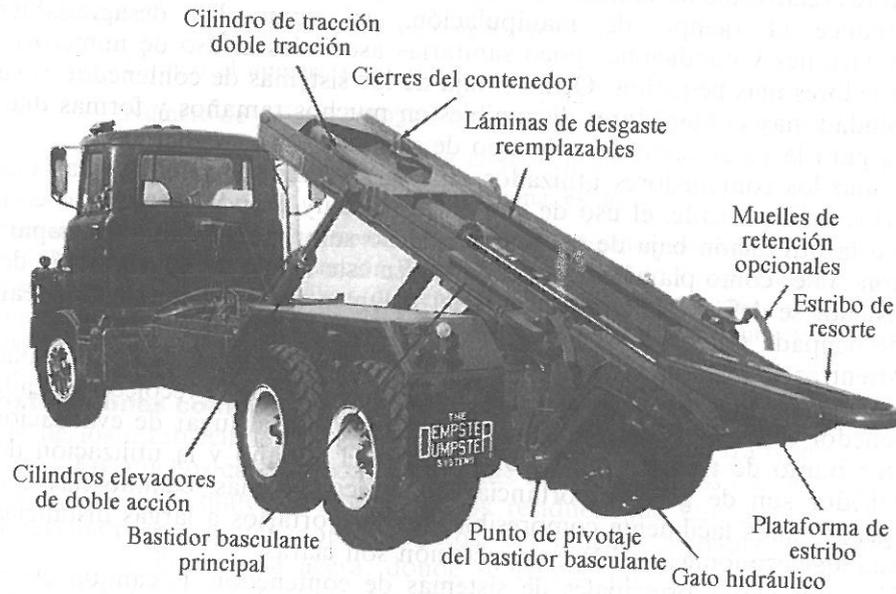


FIGURA 8.10 Camión con mecanismo de carga camión volquete utilizado para transportar y descargar contenedores de gran capacidad. (Cortesía de Dempster Dumpster Systems.)

TABLA 8.3 Datos representativos sobre las capacidades de los contenedores disponibles para ser usados con diversos sistemas de recolección

Vehículo	Tipo de contenedor	Rango típico de capacidades de contenedores ^a , m ³
Sistema de contenedor		
Camión montacargas	Utilizado con compactador estacionario	4,5-9
Camión basculante	De caja abierta	9-38
	Utilizado con compactador estacionario	11-30
	Equipado con mecanismo de compactación propio	15-30
Camión tractor	Remolque de basuras abierto	11-30
	Contenedores cerrados montados sobre remolques equipados con mecanismos de compactación propios	15-30
Sistema de caja fija		
Compactador mecánicamente cargado	Cerrado y de carga lateral	1-6
Compactador mecánicamente cargado	Contenedores especiales utilizados para la recolección de residuos domésticos de viviendas individuales	0,17-0,34
Compactador manualmente cargado	Contenedores pequeños de plástico o metal galvanizado, bolsas desechables de papel y plástico	0,06-0,16

^a Ver Tabla 7.2 para las dimensiones de un contenedor típico.



FIGURA 8.11

Vaciando en un vertedero el contenido de un contenedor cargado en un camión volquete.

conjuntamente con compactadoras estacionarias son comunes en complejos de pisos, servicios comerciales y estaciones de transferencia. Por el gran volumen que se puede transportar, el uso del sistema de contenedor con camión volquete ha llegado a extenderse, especialmente entre los recogedores privados que sirven contratos comerciales.

Sistemas contenedor-remolque. La aplicación de los contenedores-remolque es similar a aquella utilizada para los sistemas de contenedor camión volquete. Los contenedores-remolque son los mejores para la recolección de residuos especialmente pesados, tales como arena, madera, metal de chatarra, y frecuentemente se utilizan para la recolección de residuos de lugares de demolición y construcción (ver Figura 8.12).

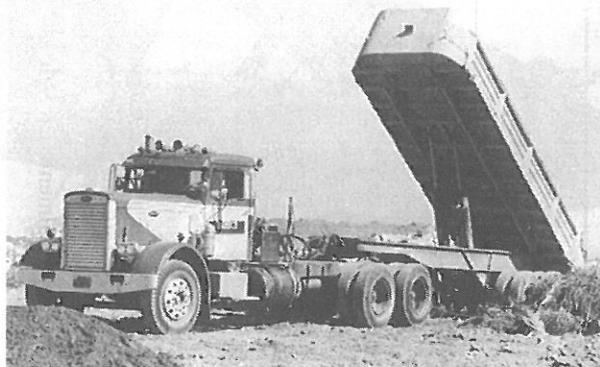


FIGURA 8.12

Vaciando en un vertedero el contenido de un contenedor remolque utilizado para residuos de demolición.

Necesidades de personal para el sistema de contenedor transportado.

En la mayoría de los sistemas de contenedor transportado se utiliza un único recolector-conductor. El recolector-conductor es el responsable de conducir el vehículo, vaciar los contenedores llenos en el vehículo de recolección, vaciar los contenedores en el lugar de evacuación (o punto de transferencia), y volver a su sitio los contenedores vacíos. En algunos casos, por razones de seguridad, se utilizan dos personas, un conductor y un ayudante. El ayudante es normalmente el responsable de atar y desatar las cadenas y cables utilizados en la carga y descarga de los contenedores del vehículo de recolección; el conductor es el responsable de la operación del vehículo de recolección. Siempre debe usar un conductor y ayudante cuando se van a manejar residuos peligrosos.

Sistemas de caja fija

Los sistemas de caja fija se pueden utilizar para la recolección de todo tipo de residuos. Los sistemas varían según el tipo y la cantidad de residuos, tanto como según el número de puntos de generación. Hay dos clases principales: 1) sistemas que utilizan vehículos cargados mecánicamente (ver Figuras 8.3, 8.4, y 8.6), y 2) sistemas en que se utilizan vehículos cargados manualmente (ver Figuras 8.1 y 8.13). Por las ventajas económicas implicadas, casi todos los vehículos de recolección utilizados actualmente van equipados con mecanismos internos de compactación. En la Tabla 8.4 se presentan los datos sobre los vehículos de recolección utilizados en este sistema. En el Apéndice E se presentan los datos de coste para los vehículos de recolección utilizados en el sistema de caja fija.



(a)



(b)

FIGURA 8.13

Tipos de vehículos de recolección: (a) vehículo de recolección con volante a la derecha y conducción de pie, cargado lateralmente, y (b) recogedor vaciando manualmente un contenedor en un vehículo de recolección compactador, cargado desde atrás (este tipo de vehículo se utiliza frecuentemente con equipos de dos o tres personas para la recolección de residuos domésticos y comerciales a lo largo de Estados Unidos).

TABLA 8.4
Vehículos utilizados para la recolección de residuos sólidos

Vehículo de recolección		Dimensiones globales típicas de vehículos de recolección					Método de descarga
Tipo	Capacidades disponibles de contenedor o chasis de camión ^a , m ³	Número de ejes	Con la capacidad indicada de chasis de camión ^b , m ³	Anchura, m	Altura, m	Longitud ^c , m	
Sistemas de contenedor transportado							
Camión montacargas	4,5-9,2	2	7,6	2,40	2,0-2,5	2,8-3,8	Gravedad, abriendo el fondo
Camión basculante	9,2-38,2	3	23	2,44	2,0-2,3	5,6-7,6	Gravedad, por inclinación
Camión tractor remolque de basuras	11,5-30,6	3	30,6	2,44	2,3-3,8	5,6-11,4	Gravedad, por inclinación
Sistema de caja fija							
Compactador (mecánicamente cargado)							
De carga frontal	15,3-34,4	3	23	2,44	3,6-3,8	6,1-7,4	Placa eyectora hidráulica
De carga lateral	7,6-27,5	3	23	2,44	3,4-3,8	5,6-6,6	Placa eyectora hidráulica
De carga trasera	7,6-23	2	15,3	2,44	3,2-3,4	5,3-5,8	Placa eyectora hidráulica
Compactador (manualmente cargado)							
De carga lateral	7,6-28,3	3	28,3	2,44	3,4-3,8	6,1-7,6	Placa eyectora hidráulica
De carga trasera	7,6-23	2	15,3	2,44	3,2-3,4	5,3-5,8	Placa eyectora hidráulica

^a Ver Tablas 8.2 y 7.2.

^b Ver Tabla 7.2 para las dimensiones de contenedores típicos.

^c Desde la parte delantera del camión hasta la parte trasera del contenedor o del chasis del camión.

Sistemas con vehículos de recolección cargados mecánicamente. El tamaño y la utilización del contenedor no son tan críticos en los sistemas de caja fija que utilizan vehículos de recolección equipados con un mecanismo de compactación como lo son en sistemas de camión volquete. Los viajes a la instalación de recuperación de materiales (IRM), estación de transferencia o lugar de evacuación se hacen después de haber recogido y compactado los contenidos de varios contenedores y que se llene el vehículo de recolección. Por esta razón, la utilización del conductor en términos de cantidades de residuos transportados es considerablemente mayor en estos sistemas que en sistemas de contenedor.

Hay disponibles una gran variedad de tamaños de contenedores para usar con estos sistemas (ver Tabla 8.3 y Figuras 8.3, 8.6 y 8.8). Los contenedores varían desde algunos relativamente pequeños (300 l) hasta tamaños comparables con aquellos manipulados por un camión volquete (ver Tabla 8.3). Los contenedores más pequeños ofrecen mayor flexibilidad en términos de forma, facilidad de carga y también conducen a un considerable incremento en su utilización. También se pueden usar estos sistemas para la recolección de residuos domésticos sustituyendo un contenedor grande por varios contenedores pequeños.

Como la carrocería de los camiones es difícil de mantener por los pesos implicados, estos sistemas no son aptos para la recolección de residuos industriales pesados y basuras en bruto, como se producen en lugares de demolición y construcción. Las localizaciones donde se producen altos volúmenes de residuos también son difíciles de servir por las necesidades de espacio que implican un gran número de contenedores.

Sistemas con vehículos de recolección cargados manualmente. La mayor aplicación de métodos manuales de carga es en la recolección de residuos domésticos y de la calle (ver Figura 8.1a). La carga manual puede competir eficazmente con la carga mecánica en las zonas residenciales, porque la cantidad recolección en cada localización es pequeña y el tiempo de carga es corto. Además, se utilizan métodos manuales para la recolección doméstica porque muchos puntos de toma individuales son inaccesibles a los vehículos de recolección mecanizados con carga automática.

Se debe prestar una atención especial al diseño del vehículo de recolección que se va a utilizar con un único recolector-conductor. De momento, parece que un compactador lateralmente cargado, como se muestra en Figuras 8.1a y 8.13a, equipado con volante a la derecha y conducción de pie, es el más apto para la recolección en acera y callejón.

Operaciones de transferencia. Las operaciones de transferencia, en las que los residuos, contenedores o cajas de los vehículos de recolección que contienen los residuos se transfieren desde un vehículo de recolección a un vehículo de transferencia o transporte, se utilizan principalmente por consideraciones económicas. Las operaciones de transferencia pueden ser económicamente factibles cuando 1) se utilizan vehículos de recolección relativamente pequeños y cargados manualmente para la recolección de residuos domésticos

y se necesitan largas distancias de transporte; 2) hay que transportar cantidades extremadamente grandes de residuos a largas distancias, y 3) una estación de transferencia puede ser utilizada por varios vehículos de recolección. En el Capítulo 10 se consideran en detalle las operaciones de transferencia y transporte.

Necesidades de personal para sistemas de caja fija. Las necesidades de personal para los sistemas de recolección con caja fija varían según sea la forma de cargar el vehículo de recolección, mecánicamente o manualmente. Las necesidades de mano de obra en los sistemas de caja fija cargada mecánicamente son esencialmente iguales que para los sistemas de contenedor. Cuando se usa un ayudante, el conductor a menudo le ayuda a llevar los contenedores, montados en rodillos, hasta el vehículo de recolección y a devolver los contenedores vacíos. Ocasionalmente, se utiliza un conductor y dos ayudantes cuando hay que mover los contenedores hasta el vehículo de recolección desde lugares inaccesibles, tales como zonas céntricas comerciales muy congestionadas.

En los sistemas de caja fija donde se carga manualmente el vehículo de recolección, el número de recolectores varía de uno a tres en la mayoría de los casos, según el tipo de servicio y el equipamiento de recolección. Normalmente se usan dos personas, un recolector y un conductor, para el servicio de acera y callejón, y un equipo multipersonal para el servicio de patio posterior (ver Tabla 8.1). En los sistemas de recolección con vehículos satélite, se utiliza un recolector-conductor para cada vehículo satélite de recolección. Mientras se cargan los vehículos satélite, el recolector-conductor del vehículo principal recoge los residuos localizados en la acera a lo largo de su itinerario. Aunque los tamaños de equipo anteriormente mencionados representan la práctica actual, hay muchas excepciones. En muchas ciudades se utilizan equipos multipersonales para el servicio en acera tanto como para el servicio de patio posterior.

8.3 ANÁLISIS DE SISTEMAS DE RECOLECCIÓN

Para establecer las necesidades de vehículos y mano de obra en los diversos sistemas y métodos de recolección, se debe determinar el tiempo unitario necesario para llevar a cabo cada tarea. Mediante la separación de las actividades de recolección en operaciones unitarias, se pueden 1) desarrollar datos de diseño y relaciones que son universalmente válidas y 2) evaluar las variables asociadas con las actividades de recolección y las variables relacionadas o controladas por la localización individual. La siguiente exposición se intenta que sirva como introducción a los tipos de información y datos necesarios para evaluar correctamente las operaciones y sistemas de recolección de residuos.

Definición de términos

Antes de poder modelizar eficazmente las relaciones para los sistemas de recolección, se deben diseñar las tareas por componente. En las Figuras 8.14 y 8.15, respectivamente, se muestran de una forma esquemática las tareas

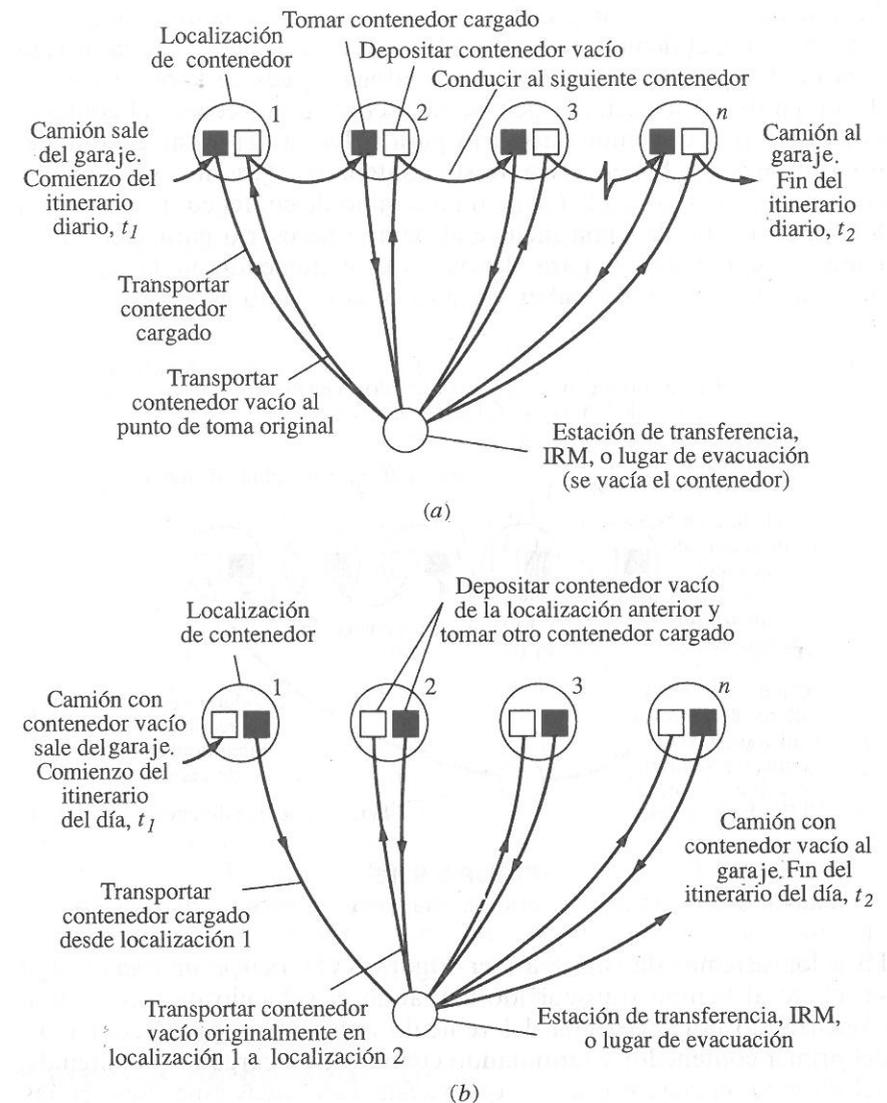


FIGURA 8.14

Esquema de secuencia operacional para sistema de contenedor: (a) forma convencional y (b) forma de intercambio de contenedor.

operacionales de los sistemas con contenedor y caja fija. Las actividades implicadas en la recolección de residuos sólidos se pueden concretar en cuatro operaciones unitarias: 1) toma, 2) transporte, 3) lugar de descarga, y 4) tiempo muerto [5, 7].

Tiempo de toma. La definición del término *tiempo de toma* depende del tipo de sistema de recolección utilizado.

1. Para los sistemas de contenedor operados de forma convencional (ver Figura 8.14a), el tiempo de toma (TT_{sc}) se refiere al tiempo transcurrido conduciendo hasta el siguiente contenedor después de haber depositado un contenedor vacío, el tiempo transcurrido en recoger el contenedor cargado, y el tiempo necesario para volver a depositar el contenedor después de haber vaciado su contenido. Para los sistemas de contenedor operado en la forma intercambio de contenedor (ver Figura 8.14b), el tiempo de toma incluye el tiempo necesario para recoger un contenedor cargado y para depositar el contenedor en la siguiente localización después de haber vaciado su contenido.

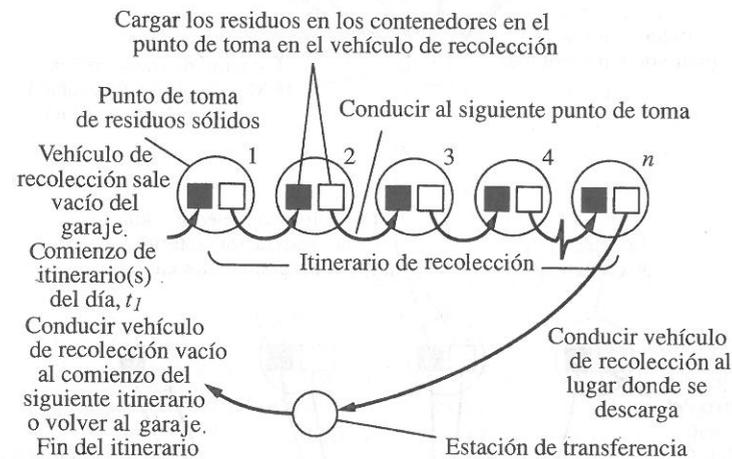


FIGURA 8.15

Esquema de la secuencia operacional para un sistema de caja fija.

2. Para los sistemas de caja fija (ver Figura 8.15), *tiempo de toma* (TT_{sc}) se refiere al tiempo transcurrido cargando el vehículo de recolección, comenzando por la parada del vehículo antes de cargar el contenido del primer contenedor y terminando cuando se ha cargado el contenido del último contenedor que hay que vaciar. Las tareas específicas en las operaciones de toma dependen tanto del tipo de vehículo de recolección utilizado como de los métodos de recolección utilizados.

Transporte. La definición del término *transporte* también depende del tipo de sistema de recolección utilizado.

1. Para los sistemas de contenedor, *transporte* representa el tiempo necesario para llegar al lugar donde se va a vaciar el contenido del contenedor (por ejemplo, estación de transferencia, IRM, o lugar de evacuación), comenzando cuando se carga en el camión un contenedor con residuos y continuando con el tiempo transcurrido después de dejar el lugar de descarga hasta que el camión llega al lugar donde se va a

- redepositar el contenedor vacío. El tiempo de transporte no incluye el tiempo transcurrido en la descarga del contenedor.
2. Para los sistemas de caja fija, el transporte se refiere al tiempo requerido hasta llegar al lugar donde se va a vaciar el contenido del vehículo de recolección (por ejemplo, estación de transferencia, IRM, o lugar de evacuación), comenzando cuando se ha vaciado el último contenedor del itinerario, o el vehículo de recolección está lleno, y continuando con el tiempo transcurrido después de dejar el lugar de descarga hasta que el camión llega al lugar donde se encuentra el primer contenedor que hay que vaciar en el siguiente itinerario de recolección.

Lugar de descarga. La unidad de operación *lugar de descarga* (ld) se refiere al tiempo transcurrido en el lugar donde se descarga el contenido del contenedor (sistema de contenedor) o el vehículo de recolección (sistema de caja fija) (por ejemplo, estación de transferencia, IRM, o lugar de evacuación), e incluye tanto el tiempo transcurrido esperando a descargar como el tiempo transcurrido descargando los residuos del contenedor o vehículo de recolección.

Tiempo muerto. La unidad de operación *tiempo muerto* (TM) incluye todo el tiempo transcurrido en actividades que no son productivas desde el punto de vista de la operación global de recolección. Muchas de las actividades asociadas al tiempo muerto a veces son necesarias o inherentes a la operación. Por lo tanto se puede dividir en dos categorías el tiempo transcurrido en actividades de tiempo muerto: necesario e innecesario. Sin embargo, en la práctica ambos, necesario e innecesario, se consideran conjuntamente porque tienen que ser distribuidos igualmente a lo largo de la operación completa. Tiempo muerto necesario incluye: 1) tiempo transcurrido registrando y saliendo por la mañana y al final del día, 2) tiempo perdido debido a los problemas de tráfico, y 3) tiempo transcurrido en arreglar equipamiento, mantenimiento, etc. Tiempo muerto innecesario incluye el tiempo transcurrido para comer, en exceso del período delimitado para comer, y el tiempo transcurrido en tomar el café sin autorización, hablando con amigos, etc.

Sistemas de contenedor

El tiempo requerido por viaje, que también corresponde al tiempo requerido por contenedor, es igual a la suma del tiempo de toma, el tiempo en el lugar de descarga y el tiempo de transporte, y se obtiene con la siguiente ecuación:

$$T_{sc} = (TT_{sc} + ld + tr) \quad (8.1)$$

donde:

- T_{sc} = Tiempo por viaje para sistema de contenedor, h/viaje.
- TT_{sc} = Tiempo de toma por viaje para sistema de contenedor, h/viaje.
- ld = Tiempo en el lugar de descarga por viaje, h/viaje.
- tr = Tiempo de transporte por viaje, h/viaje.

Para los sistemas de contenedor los tiempos de toma y en el lugar de descarga son relativamente constantes, pero el tiempo de transporte depende de la velocidad y de la distancia. A través del análisis de una gran cantidad de datos relativos al transporte, para varios tipos de vehículos de recolección (ver Figura 8.16), se ha descubierto que [5, 7] el tiempo de transporte se puede aproximar mediante la siguiente expresión:

$$tr = a + bx \tag{8.2}$$

donde:

- tr = Tiempo total de transporte, h/viaje.
- a = Constante empírica de tiempo de transporte, h/viaje.
- b = Constante empírica de tiempo de transporte, h/km.
- x = Distancia media por viaje de transporte de ida y vuelta, km/viaje.

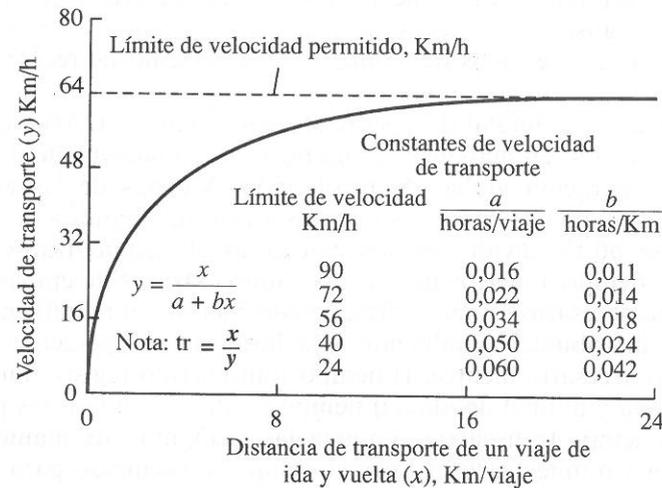


FIGURA 8.16

Correlación entre velocidad media de transporte y distancia por viaje de transporte de ida y vuelta para vehículos de recolección de residuos [6].

Para lugares donde hay varios puntos de recolección localizados en una zona de servicio dada, se puede utilizar en la ecuación (8.2) la distancia media por viaje de transporte de ida y vuelta desde el centro de gravedad de la zona de servicio hasta el lugar de evacuación. En el Ejemplo 8.2, al final de esta exposición se ilustra la determinación de las constantes del tiempo de transporte.

Sustituyendo en la Ecuación (8.1) la expresión tr dada en la Ecuación (8.2), el tiempo por viaje se puede expresar de la siguiente forma:

$$T_{sc} = (TT_{sc} + ld + a + bx) \tag{8.3}$$

El tiempo de toma por viaje, TT_{sc} , para sistema de contenedor es igual a:

$$TT_{sc} = tc + dc + cec \tag{8.4}$$

donde:

- TT_{sc} = Tiempo de toma por viaje, h/viaje.
- tc = Tiempo requerido para recoger el contenedor cargado, h/viaje.
- dc = Tiempo requerido para descargar el contenedor vacío, h/viaje.
- cec = Tiempo requerido para conducir entre las localizaciones de contenedores, h/viaje.

Si se desconoce el tiempo medio requerido para conducir entre contenedores, se puede estimar el tiempo utilizando la Ecuación (8.2). La distancia entre contenedores se sustituye por la distancia de transporte de ida y vuelta, y se deberían usar las constantes del tiempo de transporte para 25 km/h (ver Figura 8.16).

El número de viajes que se pueden hacer por vehículo/día con un sistema de contenedor, teniendo en cuenta el factor tiempo muerto TM , se puede determinar utilizando la Ecuación (8.5):

$$N_d = [H(1 - TM) - (t_1 + t_2)]/T_{sc} \tag{8.5}$$

donde:

- N_d = Número de viajes por día, viajes/día.
- H = Jornada de trabajo, h/d.
- TM = Factor tiempo muerto, expresado como fracción.
- t_1 = Tiempo de conducción desde el garaje hasta el primer contenedor del día, h.
- t_2 = Tiempo de conducción desde el último contenedor del día hasta el garaje, h.
- T_{sc} = Duración del tiempo por viaje, h/viaje.

Para derivar la Ecuación (8.5), se supone que las actividades de tiempo muerto pueden producirse en cualquier momento del día. Se pueden utilizar los datos dados en la Figura 8.16 y en la Tabla 8.5 para la solución de la Ecuación (8.5), para varios tipos de sistemas de contenedor. El factor tiempo muerto en la Ecuación (8.5) varía desde 0,10 hasta 0,40; un factor de 0,15 es representativo para la mayoría de las operaciones. La aplicación de las Ecuaciones (8.3), (8.4) y (8.5) se ilustra en el Ejemplo 8.2.

El número de viajes que se pueden hacer por día, calculados desde la Ecuación (8.5), puede compararse con el número de viajes requeridos por día (o semana), que se pueden calcular utilizando la siguiente expresión:

$$N_d = V_d/(cf) \tag{8.6}$$

donde:

- N_d = Número de viajes por día, viajes/día
- V_d = Cantidad media de residuos recogidos por día, m^3/d .
- c = Tamaño medio de contenedor, $m^3/viaje$
- f = Factor medio asignado de utilización de contenedor.

TABLA 8.5

Datos representativos para usar en el cálculo de necesidades de equipamiento y mano de obra para diversos sistemas de recolección^a

Datos de recolección		Relación de compactación, <i>r</i>	Tiempo requerido para tomar un contenedor cargado y depositar un contenedor vacío, h/viaje	Tiempo requerido para vaciar el contenido de un contenedor cargado, h/contenedor	Tiempo en el lugar de descarga, h/viaje
Vehículo	Método de carga				
Sistema de contenedor transportado					
Camión montacargas	Mecánico	—	0,067		0,053
Camión basculante	Mecánico	—	0,40		0,127
Camión basculante	Mecánico	2,0-4,0 ^a	0,40		0,133
Sistema de caja fija					
Compactador	Mecánico	2,0-2,5		0,008-0,5 ^b	0,10
Compactador	Manual	2,0-2,5		—	0,10

^a Contenedores utilizados conjuntamente con compactador estacionario.
^b Tiempo requerido varía según el tamaño del contenedor.

Como se ha señalado anteriormente, se puede definir el factor de utilización de contenedor como la fracción del volumen del contenedor ocupado por los residuos sólidos. Como este factor variará según el tamaño del contenedor, se utiliza en la Ecuación (8.6) un factor de utilización de contenedor. El factor se consigue dividiendo la suma de los valores obtenidos al multiplicar el número de contenedores de cada tamaño por su factor de utilización correspondiente entre el número total de contenedores.

Ejemplo 8.2. Determinación de las constantes de velocidad de transporte. Se obtenían las siguientes velocidades medias para varias distancias de viajes de ida y vuelta a un lugar de evacuación (ver comentario, al final del ejemplo). Encontrar las constantes *a* y *b* de velocidad de transporte y el tiempo de transporte para un viaje de ida y vuelta a un lugar situado a 17,7 km.

Distancia de viaje de ida y vuelta (<i>x</i>), km/viaje	Velocidad de transporte media (<i>y</i>), km/h	Tiempo total (<i>h = x/y</i>), h
3,2	27,4	0,12
8,1	45,1	0,18
12,9	51,5	0,25
19,3	57,9	0,33
25,7	64,4	0,40
32,2	67,6	0,48
40,2	72,4	0,56

Solución

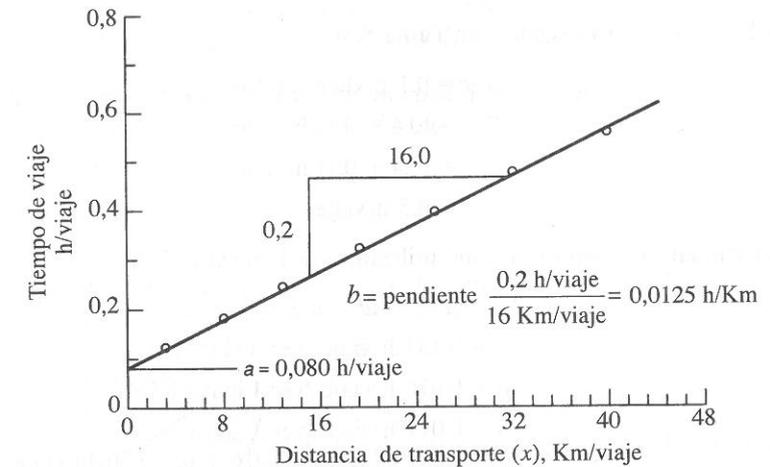
1. Poner en forma lineal la ecuación de transporte dada en la Figura 8.16. La ecuación base de la velocidad de transporte es

$$y = \frac{x}{a + bx}$$

La forma lineal de esta ecuación es

$$\frac{x}{y} = h = a + bx$$

2. Representar *x/y*, que es el tiempo total del viaje de transporte frente a la distancia del viaje de ida y vuelta como se ilustra a continuación.



3. Determinar las constantes del tiempo de transporte *a* y *b*. Cuando *x* = 0, *a* = valor de intercepción = 0,080 h/viaje, *b* = inclinación de línea = 0,2 (h/viaje)/(16,1 km/viaje) = 0,012 h/km.
4. Calcular el tiempo de transporte para el viaje de ida y vuelta hasta un lugar situado a 17,7 km.

Distancia de ida y vuelta = 2(17,7 km/viaje) = 35,4 km/viaje

Tiempo de transporte de ida y vuelta $h = a + bx =$
 $= 0,080 \text{ h/viaje} + (0,012 \text{ h/km})(35,4 \text{ km}) =$
 $= 0,51 \text{ h/viaje}$

Comentario. Cuando se determine, en campo, el tiempo necesario para viajar al lugar de evacuación, se deberían determinar los tiempos aproximadamente en los mismos horarios en los que los vehículos de recolección estarán viajando hacia y desde el lugar de descarga. Los datos del tiempo de transporte recogidos durante el horario de trabajo incluirían los efectos de la congestión vial, las condiciones climatológicas, etc.

Ejemplo 8.3. Análisis de un sistema de contenedor. Se van a recoger los residuos sólidos de un nuevo polígono industrial en grandes contenedores, algunos de los cuales van a utilizarse conjuntamente con compactadores estacionarios. Basándose en los estudios de tráfico hechos en polígonos similares, se estima que el tiempo medio para conducir desde el garaje hasta el primer contenedor (t_1) y desde el último contenedor (t_2) hasta el garaje, cada día, será de 15 y 20 minutos, respectivamente. Si el tiempo medio para conducir entre contenedores es de 6 minutos y la distancia de ida al lugar de evacuación es 25 km (límite de velocidad: 90 km/hora), determinar el número de contenedores que pueden vaciarse al día, basándose en un día laboral de 8 horas. Suponer que el factor tiempo muerto, W , es igual a 0,15.

Solución

- Determinar el tiempo de toma por viaje utilizando la Ecuación (8.4).

$$TT_{sc} = tc + dc + cec$$

Utilice $tc = 0,4$ h/viaje (ver Tabla 8.5)

$$\begin{aligned} cec &= 0,1 \text{ h/viaje (dado)} \\ TT_{sc} &= (0,4 + 0,1) \text{ h/viaje} \\ &= (0,4 + 0,1) \text{ h/viaje} \\ &= 0,5 \text{ h/viaje} \end{aligned}$$

- Determinar el tiempo por viaje utilizando la Ecuación (8.3)

$$\begin{aligned} T_{sc} &= (TT_{sc} + ld + a + bx) \\ s &= 0,133 \text{ h/viaje (ver Tabla 8.5)} \\ a &= 0,016 \text{ h/viaje (ver Figura 8.16)} \\ b &= 0,011 \text{ h/viaje (ver Figura 8.16)} \\ T_{sc} &= [(0,5 + 0,133 + 0,016 + 0,011(50)) \text{ h/viaje} \\ &= 1,20 \text{ h/viaje} \end{aligned}$$

- Determinar el número de viajes que se pueden hacer por día utilizando la Ecuación (8.5).

$$N_d = [H(1 - TM) - (t_1 + t_2)]/T_{sc}$$

Utilice $H = 8$ h (dado)

$$TM = 0,15 \text{ (supuesto)}$$

$$t_1 = 0,25 \text{ h (dado)}$$

$$t_2 = 0,33 \text{ h (dado)}$$

$$T_{sc} = 1,20 \text{ h/viaje}$$

$$\begin{aligned} N_d &= [8(1 - 0,15) - (0,25 + 0,33)]/(1,20 \text{ h/viaje}) \\ &= (6,8 - 0,58)/(1,20 \text{ h/viaje}) \\ &= 5,18 \text{ viajes/día} \end{aligned}$$

Utilice $N_d = 5,0$ viajes/día

- Determinar la duración real del día laboral.

$$\begin{aligned} 5 \text{ viajes/día} &= [H(1 - 0,15) - 0,58]/(1,20 \text{ h/viaje}) \\ H &= 7,74 \text{ (esencialmente 8 h)} \end{aligned}$$

Comentario. Cuando se obtienen fracciones en necesidades de equipamiento y de mano de obra, debe investigarse el uso de grandes contenedores y una frecuencia de recolección reducida. Si se supone que no se produce ninguna actividad de tiempo muerto durante los tiempos t_1 y t_2 , entonces teóricamente se pueden hacer 5,18 viajes/día. En la práctica, sólo se harían 5 viajes/día. Sin embargo, si el número de viajes posibles por día fuese 5,8, podría ser rentable pagar horas extras al conductor y hacer 6 viajes/día.

Sistemas de caja fija

Por las diferencias en los procesos de carga, en la siguiente exposición se tratan por separado los sistemas de caja fija mecánica y manualmente cargados.

Vehículos de recolección cargados mecánicamente. Para los sistemas que utilizan vehículos de recolección de carga automática, el tiempo por viaje se expresa como

$$T_{scf} = (TT_{scf} + ld + a + bx) \quad (8.7)$$

donde:

- T_{scf} = Tiempo por viaje para sistema de caja fija, h/viaje.
- TT_{scf} = Tiempo de toma por viaje para sistema de caja fija, h/viaje.
- s = Tiempo en el lugar de descarga por viaje, h/viaje.
- a = Constante empírica, h/viaje.
- b = Constante empírica, h/km.
- x = Distancia media de viaje de transporte de ida y vuelta, km/viaje.
- ld = Tiempo en el lugar de descarga h/viaje.

Como en el caso de sistema de contenedor, si no hay más información disponible, la distancia media de viaje de ida y vuelta desde el centro de gravedad de la zona de servicio hasta el lugar de evacuación puede calcularse con la Ecuación (8.7). La única diferencia entre la Ecuación (8.7) y la Ecuación (8.3) para los sistemas de contenedor es el término toma. Para el sistema de caja fija, el tiempo de toma viene dado por

$$TT_{scf} = C_v(tc) + (n_p - 1)(cec) \quad (8.8)$$

donde:

- TT_{scf} = Tiempo de toma por viaje para sistema de caja fija, h/viaje.
- C_v = Número de contenedores vaciados por viaje, contenedores/viaje.
- tc = Tiempo medio de descarga por caja fija en sistema de caja fija, h/caja.
- n_p = Número de puntos de toma de contenedor por viaje, localizaciones/viaje.
- cec = Tiempo medio transcurrido conduciendo entre contenedores, h/localización.

El término $(n_p - 1)$ representa el número de veces que el vehículo de recolección tendrá que ser conducido entre localizaciones de contenedores y es igual al número de localizaciones de contenedores menos 1. Como en el caso de sistema de contenedor, si se desconoce el tiempo transcurrido conduciendo entre localizaciones de contenedores, se puede estimar utilizando la Ecuación (8.2), donde la distancia entre contenedores es sustituida por la distancia de transporte en un viaje de ida y vuelta, y se utilizan las constantes del tiempo de transporte para 25 km/h (ver Figura 8.16).

El número de contenedores que se pueden vaciar por viaje de recolección está relacionado directamente con el volumen del vehículo de recolección y con la relación de compactación que se puede conseguir. Este número se obtiene con

$$C_v = vr/cf \quad (8.9)$$

donde:

- C_v = Número de contenedores vaciados por viaje, contenedores/viaje.
- v = Volumen del vehículo de recolección, m^3 /viaje.
- r = Relación de compactación.
- c = Volumen del contenedor, m^3 /contenedor.
- f = Factor asignado de utilización de contenedor.

El número de viajes requeridos por día se puede estimar utilizando la siguiente ecuación:

$$N_d = V_d/vr \quad (8.10)$$

donde:

N_d = número de viajes de recolección requeridos por día, viajes/día.

V_d = cantidad media diaria de residuos recogidos, m^3 /d.

El tiempo requerido por día, teniendo en cuenta el factor tiempo muerto TM , se puede expresar de la siguiente forma:

$$H = [(t_1 + t_2) + N_d(T_{scf})]/(1 - TM) \quad (8.11)$$

donde:

- t_1 = Tiempo de conducción desde el garaje hasta la localización del primer contenedor que hay que recoger en el primer itinerario del día, h.
- t_2 = Tiempo de conducción desde la localización aproximada de la última toma de contenedor en el último itinerario del día hasta el garaje, h.
- Otros términos = Como han sido definidos anteriormente.

Para definir t_2 , se utiliza el término *localización aproximada* porque en el sistema caja fija normalmente se conduce el vehículo de recolección directamente de vuelta al garaje, después de haber descargado los residuos recogidos en el último itinerario. Si el tiempo por viaje desde el lugar de evacuación (o

punto de transferencia) hasta el garaje es menos de la mitad del tiempo de transporte en un viaje de ida y vuelta, se supone que t_2 es igual a cero. Si el tiempo del viaje desde el lugar de evacuación (o punto de transferencia) hasta el garaje es mayor que el tiempo del viaje desde la última localización de toma hasta el lugar de evacuación, se supone que el tiempo t_2 es igual a la diferencia entre el tiempo de conducción al garaje desde el lugar de evacuación y la mitad del tiempo de transporte medio para un viaje de ida y vuelta.

Cuando se van a realizar un número entero de viajes cada día, se puede determinar la correcta combinación de viajes por día y el tamaño del vehículo utilizando la Ecuación (8.11) conjuntamente con un análisis económico. Para determinar el volumen de camión requerido, sustituya dos o tres valores diferentes para N_d en la Ecuación (8.11), y determine los tiempos de toma disponibles por viaje. Luego, mediante cálculos sucesivos, utilizando las Ecuaciones (8.8) y (8.9), determine el volumen de camión requerido para cada valor de N_d . De los tamaños de camión disponibles, seleccione los que se correspondan más cercanamente a los valores calculados. Si los tamaños de camión disponibles son menores que los valores obtenidos, calcule el tiempo real por día que sería necesario utilizando estos tamaños. Entonces se puede seleccionar la combinación más rentable. En el Ejemplo 8.3 se ilustra la aplicación de estas ecuaciones.

Cuando el tamaño de camión es fijo y se debe realizar un número entero de viajes cada día, se puede estimar la duración de la jornada laboral necesaria utilizando las Ecuaciones (8.8), (8.9) y (8.11). Se analizan y comparan un sistema de contenedor y un sistema de caja fija en el Ejemplo 8.4.

Una vez determinadas las necesidades de mano de obra para cada combinación de tamaño de camión y número de viajes por día, se puede seleccionar la combinación más rentable. Por ejemplo, cuando son necesarias largas distancias de transporte, puede ser más rentable utilizar un vehículo de recolección grande y hacer dos viajes/día (aunque algún tiempo al final del día no sea utilizado) que usar un vehículo más pequeño y hacer tres viajes/día, utilizando así todo el tiempo disponible.

Ejemplo 8.4. Comparación entre los sistemas de contenedor y caja fija. Un recogedor privado de residuos sólidos desea localizar una IRM cerca de una zona comercial. Al recogedor le gustaría utilizar un sistema de contenedor, pero teme que los costes del transporte fuesen prohibitivos. ¿Cuál es la distancia máxima desde la zona comercial donde se puede localizar la IRM para que los costes semanales del sistema de contenedor no sobrepasen los costes de un sistema de caja fija? Suponer que se va a usar un conductor-recogedor con cada sistema y que se aplican los siguientes datos. Para los propósitos de este ejemplo suponer que los tiempos de viaje t_1 y t_2 están incluidos en el factor tiempo muerto.

1. Sistema de contenedor.

- a) Cantidad de residuos sólidos: 230 m^3 /semana
- b) Tamaño del contenedor: 6 m^3
- c) Factor de utilización de contenedor: 0,67
- d) Tiempo de toma de contenedor: 0,033 h/viaje

- e) Tiempo de descarga de contenedor: 0,033 h/viaje
- f) Constantes del tiempo de transporte: $a = 0,022$ h/viaje y $b = 0,014$ h/km
- g) Tiempo en el lugar de descarga: 0,053 h/viaje
- h) Costes indirectos: 400 \$/semana
- i) Costes operacionales: 15 \$/semana

2. Sistema de caja fija

- a) Cantidad de residuos sólidos: 230 m³/semana
- b) Tamaño del contenedor: 6 m³/localización
- c) Factor de utilización del contenedor: 0,67
- d) Capacidad del vehículo de recolección: 23 m³/viaje
- e) Relación de compactación del vehículo de recolección: 2
- f) Tiempo de descarga del contenedor: 0,05 h/contenedor
- g) Constantes de tiempo de transporte: $a = 0,022$ h/viaje y $b = 0,014$ h/km
- h) Tiempo en el lugar de descarga: 0,10 h/viaje
- i) Costes indirectos: 750 \$/semana
- j) Costes operacionales: 20 \$/h de operación

3. Características de localización

- a) Distancia media entre localizaciones de contenedores: 0,16 km
- b) Constantes para estimar el tiempo de conducción entre localizadores de contenedores para ambos sistemas, de contenedor y de caja fija, $a' = 0,60$ h/viaje y $b' = 0,042$ h/km.

Solución

1. Sistema de contenedor

- a) Determinar el número de viajes por semana, utilizando la Ecuación (8.6)

$$N_w = V_w/cf = (230 \text{ m}^3/\text{semana})/(6 \text{ m}^3/\text{viaje})(0,67) \\ = 57 \text{ viajes/semana}$$

- b) Estimar el tiempo de toma medio para el sistema de contenedor transportado, utilizando la Ecuación (8.4).

$$TT_{sc} = tc + dc + cec = tc + dc + a' + b'x \\ TT_{sc} = 0,033 \text{ h/viaje} + 0,033 \text{ h/viaje} + 0,060 \text{ h/viaje} + \\ + (0,042 \text{ h/km})(0,16 \text{ km/viaje}) \\ = 0,133 \text{ h/viaje}$$

- c) Estimar el tiempo requerido por semana,
- T_w
- , en función de la distancia de transporte de un viaje de ida y vuelta, utilizando la siguiente expresión:

$$T_w = N_w(TT_{sc} + ld + a + bx)/[H(1 - TM)] \\ T_w = (57 \text{ viajes/semana})[0,133 \text{ h/viaje} + 0,053 \text{ h/viaje} + 0,022 \text{ h/viaje} + \\ + 0,014 \text{ h/km}(x)]/[8 \text{ h/día}(1 - 0,15)] \\ = [1,74 + (0,12/\text{km})(x)] \text{ días/semana}$$

- d) Determinar el coste semanal de operación en función de la distancia de transporte de un viaje de ida y vuelta.

$$\text{Coste operacional} = (\$ 15/\text{h})(8 \text{ h/día})[1,74 + (0,12/\text{km})(x)] \text{ días/semana} \\ = [208,8 + (14,4/\text{km})(x)] \text{ \$/semana}$$

2. Sistema de caja fija

- a) Determinar el número de contenedores vaciados por viaje, utilizando la ecuación (8.9)

$$C_v = vr/cf = (23 \text{ m}^3/\text{viaje})(2)/(6 \text{ m}^3/\text{contenedor})(0,67) \\ = 11,44 \text{ contenedores} = 11 \text{ contenedores/viaje}$$

- b) Estimar el tiempo de toma de cada contenedor utilizando la Ecuación (8.8).

$$TT_{scf} = C_v t + (n_p - 1)cec \\ = C_v t + (n_p - 1)(a' + b'x) \\ = (11 \text{ contenedores/viaje})(0,050 \text{ h/contenedor}) \\ + (11 - 1 \text{ puntos/viaje})[0,06 \text{ h/puntos}] \\ + (0,042 \text{ h/km})(0,16 \text{ km/punto}) \cdot 11 \text{ puntos/viaje} \\ = 1,22 \text{ h/viaje}$$

- c) Determinar el número de viajes requeridos por semana utilizando la ecuación (8.10).

$$N_w = V_w/vr = (230 \text{ m}^3/\text{semana})/23 \text{ m}^3/\text{viaje} (2) \\ = 5 \text{ viajes/semana}$$

- d) Determinar el tiempo requerido por semana,
- T_w
- , en función de la distancia de transporte de un viaje de ida y vuelta utilizando la siguiente expresión. El término
- T_w
- representa el número entero de viajes realizados hasta el lugar donde se van a descargar los contenidos del vehículo de recolección. El valor numérico
- T_w
- se obtiene redondeando el valor de
- N_w
- hasta un valor entero.

$$T_{w(scs)} = [(N_w)TT_{scf} + t_w(ld + a + bx)]/[H(1 - TM)] \\ = \{(5 \text{ viajes/semana})(1,22 \text{ h/viaje}) + (5 \text{ viajes/semana}) \cdot \\ \cdot [0,10 \text{ h/viaje} + 0,022 \text{ h/viaje} + (0,014 \text{ h/km})(x)]\} / \\ / [(8 \text{ h/día})(1 - 0,15)] \\ = 0,99 + (0,010/\text{km})(x) \text{ días/semana}$$

- e) Determinar los costes semanales de operación en función de la distancia de transporte de un viaje de ida y vuelta.

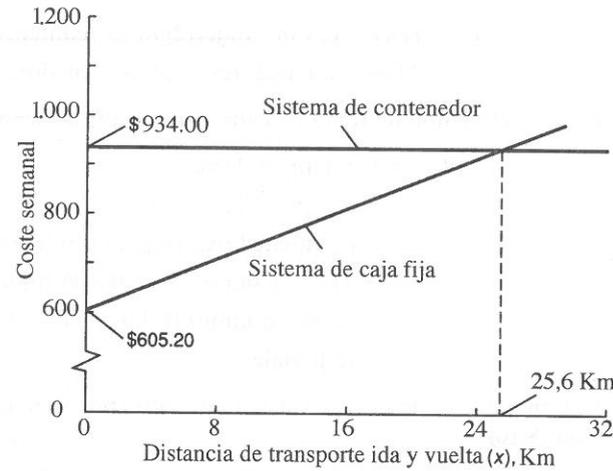
$$\text{Costos operativos} = (\$ 20/\text{h})(8 \text{ h/día}) \cdot [0,99 + (0,010/\text{km})(x)] \text{ días/semana} \\ = [158,40 + (1,6/\text{km})(x)] \text{ \$/semana}$$

3. Comparación de sistemas

- a) Determinar la distancia máxima de transporte de ida y vuelta en la que el coste de los sistemas de contenedor se iguala a los costes de los sistemas de caja fija, igualando los costes totales de los dos sistemas y solucionando mediante
- x
- .

$$\$ 400/\text{semana} + [208,8 + (14,4/\text{km})(x)] \text{ \$/semana} = \$ 750/\text{semana} + \\ + [158,40 + (1,6/\text{km})(x)] \text{ \$/semana} \\ x = 234,4 \text{ km (distancia de ida} = 11,5 \text{ km)}$$

b) Trazar el coste semanal frente a la distancia de transporte de ida y vuelta para cada sistema. A continuación se presenta el trazado requerido.



Comentario. Las curvas mostradas en la figura anteriormente presentada son representativas de las que se obtienen cuando se comparan los sistemas de contenedor con los sistemas de caja fija. En la mayoría de los casos la distancia de transporte de ida y vuelta cuando los sistemas de contenedor ya no son competitivos es mucho más corta que la mostrada en este ejemplo.

Vehículos cargados manualmente. El análisis y diseño de los sistemas de recolección doméstica que utilizan vehículos cargados manualmente puede ser calculado como se muestra a continuación. Si se trabajan H horas al día y se conoce o se fija el número de viajes que se van a realizar cada día, entonces se puede calcular el tiempo disponible para la operación de toma utilizando la Ecuación (8.11), porque se conocen todos los factores o se pueden suponer. Una vez conocido el tiempo de toma, se puede estimar el número de lugares de toma donde se pueden recoger los residuos en cada viaje de la siguiente forma:

$$N_p = 60TT_{scf}n/t_p \quad (8.12)$$

donde:

- N_p = Número de localizaciones de toma por viaje, localizaciones/viaje.
- 60 = Factor de conversión de horas a minutos, 60 min/h.
- TT_{scf} = Tiempo de toma por viaje, h/viaje.
- n = Número de recolectores.
- t_p = Tiempo de toma por localización de toma, recolector-min/localización.

El tiempo de toma por localización t_p depende del tiempo de conducción entre localizaciones de contenedores, del número de contenedores por cada locali-

zación de toma, y del porcentaje de localizaciones de toma en la parte trasera de la casa. La relación correspondiente es

$$t_p = dbc + k_1C_n + k_2 (PRH) \quad (8.13)$$

donde:

- t_p = Tiempo medio de toma por localización de toma, recolector-min/localización.
- cec = Tiempo medio de conducción entre localizaciones de contenedores, h/localización.
- k_1 = Constante relacionada con el tiempo de toma por contenedor, min/contenedor.
- C_n = Número medio de contenedores en cada localización de toma.
- k_2 = Constante relacionada con el tiempo requerido para recoger residuos desde la parte trasera de la vivienda, min/PRH.
- PRH = Localizaciones de toma en la parte trasera de las viviendas, porcentaje.

La ecuación (8.13) es típica de los tipos de ecuaciones derivadas de las observaciones en campo para el tiempo de toma por localización. El tiempo transcurrido entre localizaciones de toma dependerá de las características de la zona residencial. En la Figura 8.17 se presentan datos típicos de tiempo de toma obtenidos de observaciones en campo para una plantilla de recolección de dos personas. Si se proporciona un servicio de recolección en acera de una vez por semana, se pueden utilizar los datos de la Tabla 8.5 para estimar las necesidades de mano de obra.

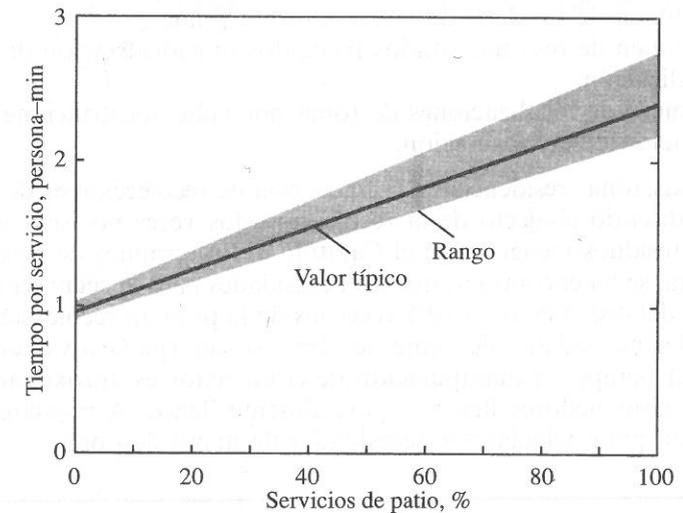


FIGURA 8.17

Relación entre necesidades de tiempo de toma y porcentaje de servicios en la parte trasera de la casa, para una plantilla de dos personas [6].

Los datos presentados en la Tabla 8.6 para una plantilla de una persona se basan en la utilización de un vehículo de recolección lateralmente cargado y equipado con conducción de pie [6] (ver Figura 8.1a). Si se utilizan camiones convencionales para la recolección en acera, el tiempo de toma por servicio, presentado en la Tabla 8.6, se debería incrementar entre un 5 y un 10 por 100. Aunque se puede utilizar la Ecuación (8.13) y los datos de la Tabla 8.6 para estimar el tiempo por localización de toma, se recomienda que se hagan mediciones en campo cuando sea posible porque las operaciones de recolección doméstica son muy variables. El uso de la Ecuación (8.13) se ilustra en el Ejemplo 8.5.

TABLA 8.6

Requisitos de mano de obra para la recolección en acera utilizando un operario

Número medio de contenedores y/o cajas por localización de toma	Tiempo de toma, operario · min/localización
1 o 2	0,50-0,60
3 o más, o servicio ilimitado	0,92

Una vez conocido el número de localizaciones de toma por viaje, entonces se puede estimar el tamaño correcto del vehículo de recolección de la siguiente forma:

$$V = V_p N_p / r \quad (8.14)$$

donde:

V = Volumen de residuos de recolección, m^3 /viaje.

V_p = Volumen de residuos sólidos recogidos por localización de toma, m^3 /localización.

N_p = Número de localizaciones de toma por viaje, localizaciones/viaje.

r = Relación de compactación.

En muchas zonas residenciales, la frecuencia de recolección es dos veces por semana. Se discutió el efecto de la recolección dos veces por semana sobre la cantidad de residuos recogidos en el Capítulo 6. En términos de necesidades de mano de obra, se ha encontrado que las necesidades para la segunda recolección semanal son del orden de 0,9 y 0,95 veces las de la primera recolección semanal. En general, las necesidades de mano de obra no son significativamente diferentes, ya que el tiempo de manipulación de contenedor es aproximadamente el mismo para contenedores llenos o parcialmente llenos. A menudo se olvida esta diferencia para calcular las necesidades de mano de obra.

Ejemplo 8.5. Diseño de un sistema de recolección doméstico. Diseñar un sistema de recolección en acera de residuos sólidos para servir a una zona residencial con 1.000 viviendas unifamiliares. Se van a evaluar dos sistemas de recolección de carga manual. El primero implica el uso de un vehículo de recolección de carga lateral con

un operario; el segundo implica el uso de un vehículo de recolección de carga trasera con dos operarios. Determinar el tiempo necesario del vehículo de recolección y comparar las necesidades de mano de obra para cada sistema de recolección. Suponer que se aplican los siguientes datos:

- Número medio de residentes por servicio: 3,5
- Tasa de generación de residuos sólidos por habitante: 1,5 kg/hab. · día
- Densidad de residuos sólidos (en contenedores): 120 kg/ m^3
- Contenedores por servicio: 2 contenedores de $121 \cdot 10^{-3} m^3$ más 1,5 contenedores de cartón ($75 \cdot 10^{-3} m^3$ de media)
- Frecuencia de recolección: 1 vez por semana
- Relación de compactación del vehículo de recolección, $r = 2,5$
- Distancia de transporte ida y vuelta: $h = 56$ km
- Duración nominal del día laboral, $H = 8$ h
- Viajes por día, $N_d = 2$
- Tiempo de viaje hasta el primer punto de toma, $t_1 = 0,3$ h
- Tiempo de viaje desde el último punto de toma, $t_2 = 0,4$ h
- Factor tiempo muerto, $TM = 0,15$
- Constantes de tiempo de transporte: $a = 0,016$ h/viaje y $b = 0,011$ h/km
- Tiempo en el lugar de descarga por viaje: $s = 0,10$ h/viaje

Solución

- Determinar el tiempo disponible para la operación de toma utilizando la Ecuación (8.11). Sustituyendo la Ecuación (8.7) por el término T_{scs} en la Ecuación (8.11) se obtiene

$$H = [(t_1 + t_2) + N_d(TT_{scf} + ld + a + bx)] / (1 - TT)$$

$$TT_{scf} = [H(1 - TT) - (t_1 + t_2)] / N_d - (s + a + bx)$$

$$= [(18 \text{ h/día})(1 - 0,15) - (0,3 \text{ h/día} + 0,4 \text{ h/día})] / (2 \text{ viajes/día}) -$$

$$- [0,10 \text{ h/viaje}] + 0,016 \text{ h/viaje} + (0,011 \text{ h/km})(56 \text{ km/viaje})]$$

$$= (3,05 - 0,73) \text{ h/viaje}$$

$$= 2,32 \text{ h/viaje}$$

- Determinar el tiempo de toma requerido por punto de toma utilizando la Ecuación (8.13).

a) Un operario

$$t_p = 0,92 \text{ min/punto (ver Tabla 8.6)}$$

b) Dos operarios

$$t_p = 0,72 + 0,18(C_n)$$

$$= 0,72 + 0,18(3,5)$$

$$= 1,35 \text{ operario-min/localización}$$

- Determinar el número de puntos de toma desde que se pueden recoger residuos, utilizando Ecuación (8.12).

a) Un operario

$$N_p = 60TT_{scf}n/t_p$$

$$= (60 \text{ min/h})(2,32 \text{ h/viaje})(1 \text{ operario}) / (0,9 \text{ operario-min/punto de toma})$$

$$= 151 \text{ puntos de toma/viaje}$$

b) Dos operarios

$$\begin{aligned} N_p &= 60TT_{sc}n/t_p \\ &= (60 \text{ min/h})(2,32 \text{ h/viaje})(2 \text{ operarios})/(1,35 \text{ operario-min/punto de toma}) \\ &= 206 \text{ puntos de toma/viaje} \end{aligned}$$

4. Determinar el volumen de residuos generado por punto de toma por semana.

$$\begin{aligned} \text{Volumen por semana por punto de toma} &= 1,5 \text{ kg/hab} \cdot \text{día} \\ &\quad (3,5 \text{ personas/punto de toma}) \\ &\quad (7 \text{ días/semana})/120 \text{ kg/m}^3(1/\text{semana}) \\ &= 0,306 \text{ m}^3/\text{punto de toma} \end{aligned}$$

5. Determinar el volumen de camión requerido utilizando Ecuación (8.14).

a) Un operario

$$\begin{aligned} v &= V_p/N_p/r \\ &= (0,306 \text{ m}^3/\text{punto de toma})(150 \text{ puntos de toma/viaje})/2,5 \\ &= 18,4 \text{ m}^3/\text{viaje} \text{ (utilice un vehículo de recolección de } 18 \text{ m}^3) \end{aligned}$$

b) Dos operarios

$$\begin{aligned} v &= V_p/N_p/r \\ &= (0,306 \text{ m}^3/\text{punto de toma})(204 \text{ puntos de toma/viaje})/2,5 \\ &= 25,0 \text{ m}^3/\text{viaje} \text{ (utilice un vehículo de recolección de } 25 \text{ m}^3 \text{ o de tamaño estándar, si hay disponible)} \end{aligned}$$

6. Determinar el número de viajes requeridos por semana.

a) Un operario

$$\begin{aligned} N_w &= (1.000 \text{ puntos de toma})(1/\text{semana})/(150 \text{ puntos de toma/viaje}) \\ &= 6,67 \text{ viajes/semana} \end{aligned}$$

b) Dos operarios

$$\begin{aligned} N_w &= (1.000 \text{ puntos de toma})(1/\text{semana})/(204 \text{ puntos de toma/viaje}) \\ &= 4,90 \text{ viajes/semana} \end{aligned}$$

7. Determinar las necesidades de mano de obra. Hay que resaltar que aunque sólo se calcula un viaje parcial, tendrá que hacerse un viaje completo al lugar donde se van a descargar los contenidos del vehículo de recolección.

a) Un operario

$$\begin{aligned} &1,0 \text{ operario } \{(6,67 \text{ viajes/semana})(2,3 \text{ h/viaje}) + \\ &\quad + (7 \text{ viajes/semana})[0,10 \text{ h/viaje} + 0,016 \text{ h/viaje} + \\ &\quad + (0,011 \text{ h/km})(56 \text{ km/viaje})\}/(1 - 0,15)(8 \text{ h/día}) = \\ &= 3,00 \text{ operarios-día/semana} \end{aligned}$$

b) Dos operarios

$$\begin{aligned} &2,0 \text{ operarios } \{(4,9 \text{ viajes/semana})(2,3 \text{ h/viaje}) + \\ &\quad + (5 \text{ viajes/semana})[0,10 \text{ h/viaje} + 0,016 \text{ h/viaje} + \\ &\quad + (0,011 \text{ h/km})(56 \text{ km/viaje})\}/(1 - 0,15)(8 \text{ h/día}) = \\ &= 4,39 \text{ operarios-día/semana} \end{aligned}$$

Comentario. Como se ha determinado en este problema, las necesidades de mano de obra para la plantilla de un solo operario son aproximadamente el 25 por 100 menores que las necesidades correspondientes para una plantilla de recolección con dos operarios. Los resultados de este ejemplo ilustran por qué la tendencia en la recolección es hacia el uso de la recolección en acera con un solo recogedor/conductor y vehículos de recolección que se pueden cargar mecánicamente o manualmente.

8.4 ITINERARIOS DE RECOLECCIÓN

Una vez determinadas las necesidades de equipamiento y mano de obra, hay que fijar los itinerarios de recolección para utilizar así eficazmente tanto a los recolectores como al equipamiento. En general, el diseño de itinerarios de recolección implica una serie de pruebas. No hay normas fijas que se puedan aplicar a todas las situaciones. Por lo tanto, actualmente, el diseño de itinerarios de recolección sigue siendo un proceso de sentido común [4].

Algunas líneas heurísticas que se deberían tener en consideración en el diseño de itinerarios son las siguientes:

1. Deben identificarse las políticas y normativas existentes relacionadas con algunos asuntos como el punto de recolección y la frecuencia de recolección.
2. Deben coordinarse las características del sistema existente, tales como el número de operarios y los tipos de vehículos.
3. Cuando sea posible, los itinerarios deberían ser diseñados para que empiecen y terminen cerca de calles principales, utilizando las barreras topográficas y físicas como bordes de itinerario.
4. En zonas de colinas, los itinerarios deberían empezar en la parte más alta y continuar cuesta abajo mientras se cargan los vehículos.
5. Los itinerarios deberían ser diseñados para que el último contenedor que hay que recoger en el itinerario se encuentre localizado lo más cerca posible del lugar de evacuación.
6. Deberían recogerse los residuos localizados en zonas de congestión vial a una hora del día tan temprana como fuera posible.
7. Se deberían servir las fuentes que generan cantidades muy grandes de residuos durante la primera parte del día.
8. Los puntos de toma desperdigados (donde se generan pequeñas cantidades de residuos) que reciben la misma frecuencia de recolección deberían ser servidos, si es posible, durante un solo viaje o en el mismo día.

Trazado de itinerarios de recolección

Los pasos habituales en el establecimiento de itinerarios de recolección incluyen: 1) preparación de mapas zonales que muestren los datos pertinentes y la información que concierne a las fuentes de generación de residuos; 2) análisis de datos y, cuando sea preciso, preparación de tablas sumarias de información; 3) trazado preliminar de itinerarios, y 4) evaluación de itinerarios preliminares y desarrollo de itinerarios equilibrados por pruebas sucesivas. El paso 1, como se argumenta a continuación, es esencialmente el mismo para todos los sistemas de recolección. Pero como la aplicación de los pasos 2, 3 y 4 es diferente para los sistemas de contenedor y caja fija, cada uno se discute por separado. El trazado de los itinerarios de recolección se ilustra en los Ejemplos 8.5 y 8.6.

Hay que resaltar que los itinerarios equilibrados preparados en oficina (paso 4) se dan a los recolectores-conductores, quienes los implantan en campo. Después, basándose en la experiencia de campo del recolector-conductor, se modifica cada itinerario para tener en cuenta las condiciones locales específicas. En los grandes municipios, los supervisores de los itinerarios son los responsables de la preparación de los itinerarios de recolección. En la mayoría de los casos los itinerarios se basan en la experiencia práctica del supervisor de itinerarios, lograda durante años trabajando en la misma sección. La siguiente exposición está diseñada para reflejar sobre papel lo que la mayoría de los supervisores de itinerarios tienen en sus cabezas.

Trazado de itinerarios de recolección. Paso 1. En un mapa a escala relativamente grande de la zona comercial, industrial o residencial que hay que servir, se deben recoger los siguientes datos para cada punto de toma de residuos sólidos: localización, frecuencia de recolección y número de contenedores. Si se utiliza un sistema de caja fija cargada mecánicamente para servicios comerciales e industriales, también hay que incluir en el mapa la cantidad estimada de los residuos que se van a recoger en cada punto de toma. Para residuos de origen doméstico, generalmente se supone que se va a recoger aproximadamente la misma cantidad media de residuos por cada fuente. A menudo, para los de origen doméstico se muestra sólo el número de viviendas por bloque.

Como el trazado de itinerarios de recolección implica una serie de pruebas sucesivas, se debe utilizar papel transparente una vez introducidos los datos básicos sobre el mapa de trabajo. Según el tamaño de la zona y el número de puntos de toma, se debería subdividir la zona en áreas que se correspondan aproximadamente con tipos de uso del terreno (por ejemplo, residencial, comercial, industrial). Para localizaciones con menos de 20 a 30 puntos de toma, normalmente este paso no es necesario. Para zonas más grandes puede que sea necesario subdividir aún más cada una de las zonas de usos similares del terreno, teniendo en cuenta factores como tasas de generación de residuos y frecuencia de recolección.

Trazado de itinerarios de recolección. Pasos 2, 3 y 4 para sistemas de contenedor. Se pueden diseñar los pasos 2, 3 y 4 para el sistema de contenedor de la siguiente forma.

Paso 2. En un programa de hoja de cálculo introduzca, primero, las siguientes cabeceras: frecuencia de recolección, veces/semana; número de puntos de toma; número total de contenedores; número de viajes, viajes/semana; y una columna individual para cada día de la semana en que se van a recoger residuos. Segundo, determine el número de puntos de toma que necesitan recolecciones múltiples durante la semana (por ejemplo, lunes-viernes o lunes, miércoles, viernes). Comience los listados con los lugares que requieran el número más alto de recolecciones semanales (por ejemplo, 5 veces/semana). Tercero, distribuya el número de contenedores que necesitan un servicio de una vez por semana para que el número de contenedores vaciados diariamente sea equilibrado en cada día de recolección. Se pueden definir los itinerarios de recolección preliminares una vez conocida esta información.

Paso 3. Utilizando la información del paso 2, los itinerarios de recolección se pueden diseñar de la siguiente forma.

Empezando en el garaje (o donde se aparca el vehículo de recolección), se debería establecer un itinerario que conecte todos los puntos de toma (contenedores) que hay que servir durante cada día de recolección. El siguiente paso es modificar el itinerario básico para incluir los contenedores adicionales que se van a servir en cada día de recolección. Se debe trazar cada itinerario diario para que comience y termine cerca del garaje. La operación de recolección debería proceder de una forma lógica, teniendo en cuenta las líneas directrices previamente citadas y las limitaciones específicamente locales.

Paso 4. Cuando se hayan trazado los itinerarios preliminares se debería calcular la distancia media que hay que viajar entre contenedores. Si los itinerarios son desequilibrados respecto a la distancia viajada (>15 por 100), se deberían rediseñar para que cada itinerario cubra aproximadamente la misma distancia. En general, hay que probar algunos itinerarios antes de poder seleccionar el itinerario final. Cuando se requiere más de un vehículo de recolección, los itinerarios de recolección para cada zona de servicio y la carga de trabajo por conductor deben trazarse de forma equilibrada.

Trazado de itinerarios de recolección. Pasos 2, 3 y 4 para sistemas de caja fija (con vehículos de recolección cargados mecánicamente). Los pasos 2, 3 y 4 para sistemas de caja fija cargados mecánicamente se pueden resumir de la siguiente forma.

Paso 2. Primero, sobre un programa de hoja de cálculo introduzca las siguientes cabeceras: frecuencia de recolección, veces/semana; número de puntos de toma, residuo total, m^3 /semana; y una columna individual para cada día de la semana durante el cual se van a recoger residuos. Segundo, determine la cantidad de residuos que hay que recoger de los puntos de toma que necesitan recolecciones múltiples durante la semana (por ejemplo, lunes a viernes o lunes, miércoles, viernes) e introduzca la información en la hoja de cálculo. Comience los listados con las localizaciones que requieran el número más alto de recogidas por semana (por ejemplo, 5 veces/semana). Tercero,

utilizando el volumen real del vehículo de recogida (volumen nominal del vehículo de recolección por relación de compactación), determine la cantidad adicional de residuos que se puede recoger cada día de los puntos que reciban un servicio de una vez por semana. Distribuya la cantidad de residuos para que la cantidad de residuos recogidos (y el número de contenedores vaciados) por viaje sea equilibrado para cada itinerario de recolección. Una vez conocida esta información se pueden trazar los itinerarios de recolección preliminares.

Paso 3. Una vez conocida la información anteriormente mencionada, se puede proceder con el trazado del itinerario de recolección de la forma siguiente. Empezando en el garaje (o donde se aparcen los vehículos de recolección), se debería fijar un itinerario que conecte todos los puntos de toma que hay que servir en cada día de recolección. Según la cantidad de residuos que hay que recoger, quizás haya que definir varios itinerarios básicos.

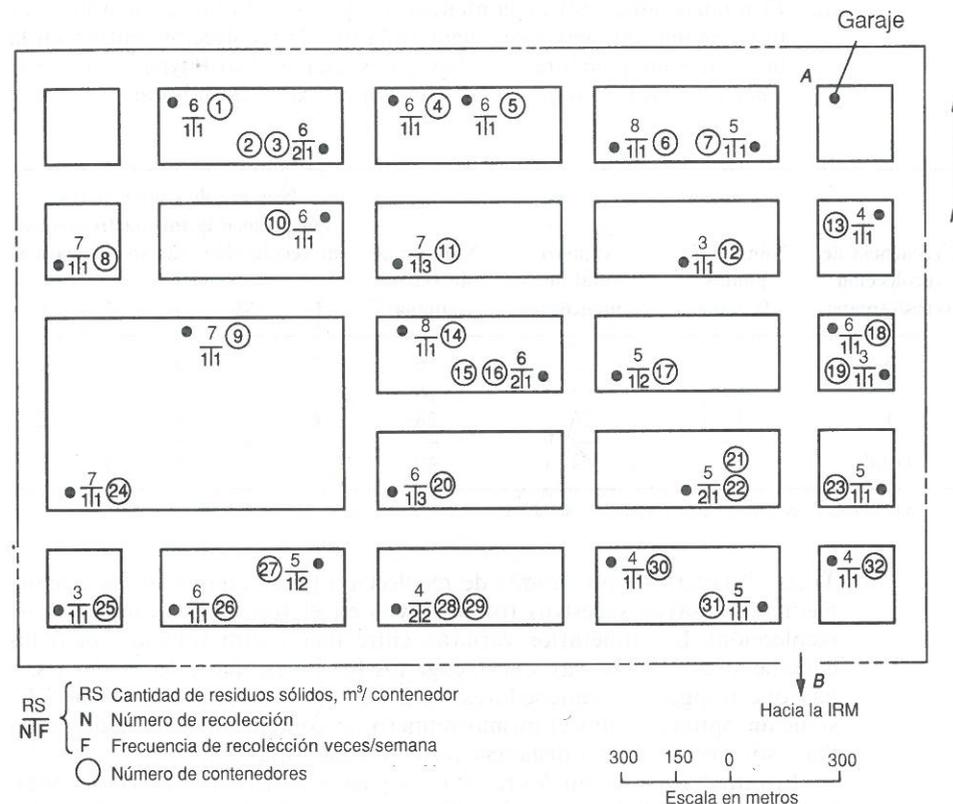
El siguiente paso es modificar el itinerario básico (o itinerarios) para incluir los puntos de toma adicionales que habrá que servir para completar la carga. Estas modificaciones se deberían hacer para que, en general, se sirva la misma zona con cada itinerario de recolección. Para las grandes zonas que han sido subdivididas y son servidas diariamente, será necesario establecer itinerarios básicos en cada zona subdividida, en algunos casos, subdividida a su vez según el número de viajes que hay que hacer cada día.

Paso 4. Cuando se hayan establecido los itinerarios de recolección, se debería determinar la cantidad de residuos que hay que recolectar y la distancia de transporte para cada itinerario. En algunos casos quizás sea necesario reajustar los itinerarios de recogida para equilibrar la carga de trabajo. Después de establecer los itinerarios, éstos deben ser dibujados en el mapa maestro.

Ejemplo 8.6. Trazado de itinerarios de recolección para un polígono industrial. Trazar los itinerarios de recolección para ambos sistemas de recolección, contenedor y caja fija, para la zona de servicio industrial mostrada en el mapa adjunto. Como se muestra en el mapa, hay un total de 28 puntos de toma y 32 contenedores. La cantidad total de los residuos que hay que recoger cada semana es de 212 m³. El mapa y la información que contiene serían preparados como un primer paso en el trazado de itinerarios de recolección.

Suponer que se aplican las siguientes condiciones:

1. Los contenedores con una frecuencia de recolección de dos veces por semana tienen que ser recogidos los martes y viernes.
2. Los contenedores con una frecuencia de recolección de tres veces por semana tienen que ser recogidos los lunes, miércoles y viernes.
3. Los contenedores pueden ser recolectados desde cualquier lado en la intersección donde están estacionados.
4. Empezar y finalizar cada día en el garaje.
5. Para el sistema de contenedor, se proporcionará la recolección los lunes-viernes, ambos incluidos.



6. Los contenedores transportados son cambiados en vez de devueltos al lugar donde fueron recogidos (ver Figura 8.14b).
7. Con el sistema de caja fija, se hace la recolección solamente 4 días/semana (lunes, martes, miércoles y viernes), con solamente 1 viaje/día.
8. Con el sistema de caja fija, el vehículo de recolección será un compactador autocargador con una capacidad de 27 m³ y una relación de compactación de 2.

Solución

1. Sistema de contenedor
 - a) Construir una tabla de resumen para la operación de recolección utilizando los datos presentados en el mapa de la zona de servicio (paso 2 en el trazado de itinerarios de recolección). A continuación se presentan la tabla de resumen y una breve descripción de las entradas en la tabla.
 - i. El número de puntos de toma y contenedores que requieren tres recolecciones por semana entran en la fila 1. Como se ha resaltado en la presentación del problema, hay que vaciar estos contenedores los lunes, miércoles y viernes.
 - ii. El número de puntos de toma que requieren dos recolecciones a la semana entran en la fila 2. Hay que vaciar estos contenedores los martes y viernes.

- iii. El número adicional de contenedores que reciben un servicio una vez por semana, que hay que vaciar cada día de recolección, entran en la fila 3. Los contenedores que hay que vaciar se distribuyen para que se vacíen el mismo número de contenedores cada día laboral.

Frecuencia de recolección veces/semana	Número de puntos de toma	Número total de contenedores	Número de de viajes/semana ^a	Número de contenedores (que reciben la misma frecuencia de recolección) vaciados cada día				
				L	M	X	J	V
3	2	2	6	2	—	2	—	2
2	4	4	8	—	4	—	—	4
1	22	26	26	6	4	6	8	2
Total	28	32	40	8	8	8	8	8

^a En el sistema de contenedor cada contenedor vaciado corresponde a un viaje.

- b) Trazar itinerarios equilibrados de recolección para cada día de la semana mediante ensayos sucesivos (pasos 3 y 4 en el trazado de itinerarios de recolección). Los itinerarios variarán entre una y otra solución, pero los contenedores 11 y 20 hay que recogerlos los lunes, miércoles y viernes, y hay que recoger los contenedores 17, 27, 28 y 29 los martes y viernes. La solución óptima tendrá el mismo número de contenedores recogidos cada día, así como la misma distancia recorrida cada día.

Los itinerarios semanales resultantes y las distancias recorridas se muestran en la tabla de la página 266. Con la excepción del primer contenedor vaciado en cada itinerario, la distancia presentada para cada contenedor incluye la distancia desde el punto B a la localización del contenedor y la distancia desde la localización del contenedor al punto B. La distancia presentada para el primer contenedor incluye la distancia desde el garaje y la distancia desde la localización del contenedor hasta el punto B.

2. Sistema de caja fija

- a) Construir una tabla de resumen para la operación de recolección utilizando los datos presentados en el mapa de la zona de servicio (paso 2 en el trazado de itinerarios de recolección), de la forma siguiente:
 - i. La cantidad de residuos que hay que recoger de los puntos que requieren tres recolecciones por semana entra en la fila 1. Como se ha resaltado en la explicación del problema, hay que recoger los residuos de estos puntos los lunes, miércoles y viernes.
 - ii. En la fila 2 entra la cantidad de residuos que hay que recoger de los puntos que requieren dos recolecciones por semana. Hay que vaciar estos contenedores los martes y viernes.
 - iii. La cantidad adicional de residuos que se puede recoger en cada itinerario de recolección se determina y entra en la fila 3. Hay que resaltar que la cantidad total de residuos que pueden ser recogidos cada día es 54 m³ [27 m³ · 2 (relación de compactación)].

Orden de recolección de contenedores	Lunes		Martes		Miércoles		Jueves		Viernes	
	N.º de contenedor	Distancia ^a								
1	A → 1	1,9	A → 7	0,3	A → 3	1,8	A → 2	1,8	A → 13	0,5
2	1 → B	3,4	7 → B	1,4	3 → B	2,7	2 → B	2,7	13 → B	1,5
3	B → 8 → B	6,3	B → 10 → B	5,4	B → 9 → B	4,7	B → 6 → B	3,9	B → 5 → B	5,0
4	B → 11 → B	4,3	B → 14 → B	4,3	B → 4 → B	5,4	B → 18 → B	1,8	B → 11 → B	4,3
5	B → 20 → B	3,1	B → 17 → B	2,8	B → 11 → B	4,3	B → 15 → B	2,9	B → 17 → B	2,8
6	B → 22 → B	1,3	B → 26 → B	3,7	B → 12 → B	2,7	B → 16 → B	2,9	B → 20 → B	3,1
7	B → 30 → B	1,7	B → 27 → B	3,3	B → 20 → B	3,1	B → 24 → B	4,9	B → 27 → B	3,1
8	B → 19 → B	2,1	B → 28 → B	2,4	B → 21 → B	1,3	B → 25 → B	4,3	B → 28 → B	2,4
	B → 23 → B	1,4	B → 29 → B	2,4	B → 31 → B	0,3	B → 32 → B	0,5	B → 29 → B	2,4
	B → A	1,5								
Distancia total ^a		27,0		27,5		27,8		27,8		26,6

^a Distancia en miles de metros.

^b Distancia total recorrida entre los puntos A y B, en miles de metros, durante cada día de recolección.

Frecuencia de recolección veces/semana	Número de puntos de toma	Total residuos m ³ /semana	Cantidad de residuos recogidos por día, m ³			
			L	M	X	V
3	2	39	13	—	13	13
2	4	37	—	18	—	18
1	22	136	41	34	40	22
Total	28	212	54	52	53	53

b) Trazar itinerarios de recolección equilibrados mediante ensayos sucesivos en términos de cantidad de residuos recogidos (pasos 3 y 4 en el trazado de itinerarios de recolección). Los itinerarios de recolección para un sistema de caja fija variarán, pero los contenedores 11 y 20 tienen que ser recogidos los lunes, miércoles y viernes, y los contenedores 17, 27, 28 y 29 tienen que ser recogidos los martes y viernes. De nuevo, la solución óptima sería conseguir una cantidad igual de residuos recogidos en cada itinerario de recolección y la misma distancia recorrida en cada itinerario.

Los itinerarios y distancias resultantes se muestran en la siguiente tabla. La distancia del viaje entre los puntos A (garaje) y B incluye la distancia desde el punto A al primer punto de toma de contenedor, la distancia recorrida en el itinerario, y la distancia desde el último punto de toma de contenedor hasta el punto B.

Orden de toma	Lunes		Martes		Miércoles		Viernes	
	N.º de cont.	m ³						
1	5	6	2	5	7	5	13	4
2	4	6	3	5	6	8	11	7
3	1	6	10	6	11	7	17	5
4	8	7	24	7	15	5	18	6
5	9	7	25	3	16	5	19	3
6	11	7	26	6	20	6	23	5
7	14	8	28	4	30	4	20	6
8	20	6	29	4	31	5	27	5
9	—	—	27	5	22	5	28	4
10	—	—	17	5	31	4	29	4
11	—	—	12	3	—	—	32	4
Total		53		53		54		53
Distancia ^a		5.791		6.706		5.182		6.401

^a Distancia total recorrida entre los puntos A y B, en m, en cada itinerario de recolección.

Comentario. En este ejemplo se evidencia la ventaja económica del sistema de caja fija. Sin embargo, si se necesitan contenedores más grandes que 9 m³, no puede usarse el sistema de caja fija.

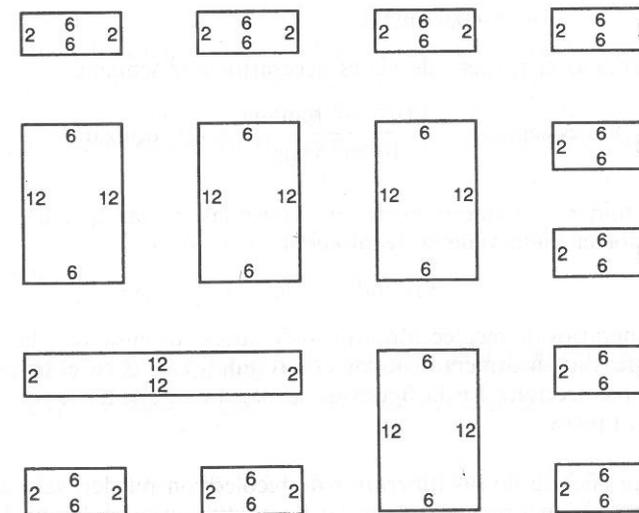
Trazado de itinerarios de recolección. Pasos 2, 3 y 4 para sistemas de caja fija (con vehículos de recolección cargados manualmente). Los pasos 2, 3 y 4 para un sistema de caja fija que se carga manualmente se puede resumir de la siguiente forma.

Paso 2. Estime la cantidad total de residuos que hay que recoger desde los puntos de toma servidos cada día que se lleva a cabo la operación de recolección. Utilizando el volumen efectivo del vehículo de recolección (volumen nominal del vehículo de recolección por relación de compactación), determine el número medio de viviendas en las que hay que recoger residuos durante cada viaje de recolección.

Paso 3. Una vez conocidos los datos anteriormente mencionados, se puede proceder con el trazado del itinerario de recolección de la forma siguiente. Empezando en el garaje trace itinerarios de recolección que incluyan todos los puntos de toma que hay que servir en cada itinerario de recolección. Se deben trazar estos itinerarios para que el último punto de toma sea el más cercano al lugar de evacuación.

Paso 4. Cuando se hayan fijado los itinerarios de recolección, se debería determinar la densidad real del contenedor y la distancia real de transporte de cada itinerario. Utilizando estos datos, se deberían comprobar las necesidades diarias de mano de obra frente al tiempo disponible de trabajo diario. En algunos casos puede que sea necesario reajustar los itinerarios de recolección para equilibrar la carga de trabajo. Después de establecer los itinerarios se deben dibujar en el mapa maestro.

Ejemplo 8.7. Trazado de itinerarios de recolección doméstica. Trazar itinerarios de recolección para la zona residencial mostrada en la figura siguiente. El mapa



2, 6, 12 = Número de viviendas en cada manzana.

de la zona de servicio sería preparado como un primer paso en el trazado de los itinerarios de recolección. Suponer que se aplican las siguientes condiciones:

1. Generales
 - a) Ocupantes por vivienda: 3,5
 - b) Tasa de recolección de residuos sólidos: 1,6 kg/habitante · día
 - c) Frecuencia de recolección: 1 vez/semana
 - d) Tipo de servicio de recolección: acera
 - e) Número de operarios: 1
 - f) Capacidad de vehículo de recolección: 10 m³
 - g) Peso específico compactado de residuos sólidos en el vehículo de recolección: 320 kg/m³
2. Restricciones del itinerario de recolección
 - a) Sin giros en U en las calles
 - b) Recolección desde cada lado de la calle con vehículo de recolección de conducción en el lado derecho y de pie.

Solución

1. Desarrollar los datos necesarios para establecer itinerarios de recolección (paso 2 en el trazado de itinerarios de recolección).
 - a) Determinar el número total de viviendas en las que se van a recoger residuos.

$$\text{Viviendas} = 10(16) + 4(36) + 1(28) = 332$$

- b) Determinar el volumen compactado de residuos sólidos que hay que recoger cada semana.

$$\begin{aligned} \text{Vol/semana} &= [(332 \text{ viviendas} \cdot 3,5 \text{ personas/vivienda} \cdot \\ &\quad \cdot 1,6 \text{ kg/persona} \cdot \text{día} \cdot 7 \text{ días/semana)] / (320 \text{ kg/m}^3) = \\ &= 40,67 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

- c) Determinar el número de viajes necesarios por semana.

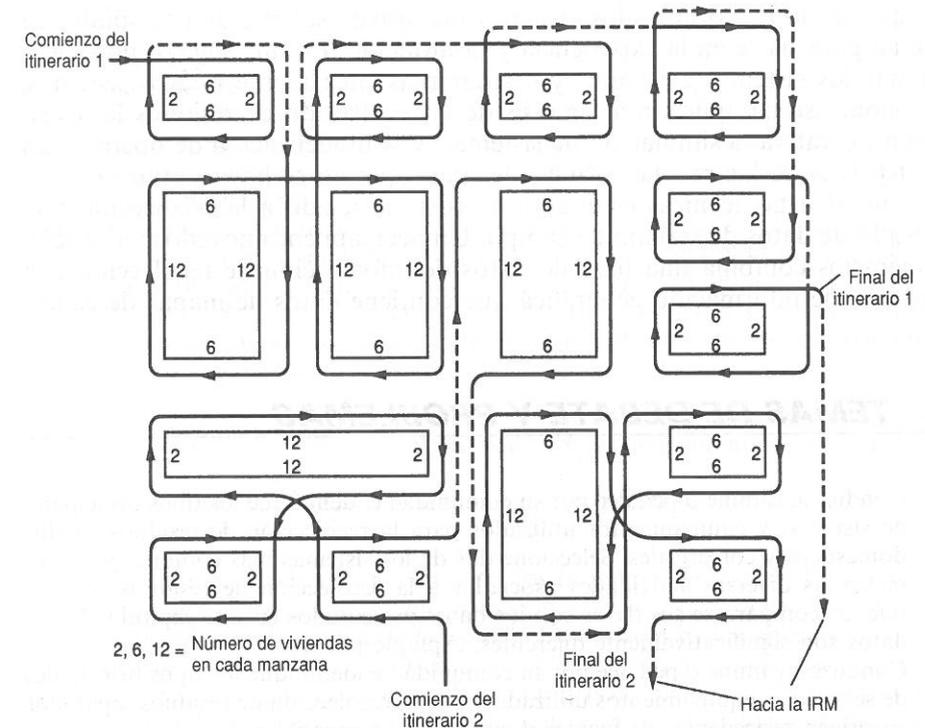
$$\text{Viajes/semana} = \frac{40,67 \text{ m}^3/\text{semana}}{10 \text{ m}^3/\text{viaje}} = 4,1; \text{ utilizar } 4$$

- d) Determinar el número medio de viviendas en las que hay que recoger residuos en cada viaje de recolección.

$$\text{Viviendas/viaje} = 332/4 = 83$$

2. Trazar itinerarios de recolección utilizando sucesivos ensayos y las restricciones de itinerarios anteriormente citadas como guía (paso 3 en el trazado de itinerarios de recolección). En la figura de la página siguiente, se muestran cuatro itinerarios típicos.

Comentario. La eficacia de los itinerarios de recolección pueden valorarse según la cantidad de superposiciones mostradas por las líneas discontinuas. Un problema interesante para el lector sería determinar si se pueden trazar cuatro itinerarios sin ninguna superposición.



Horarios

Debería prepararse, para ser utilizado por el expedidor del transporte y por el departamento de ingeniería, un horario maestro para cada itinerario de recolección. El conductor debería preparar un horario para cada itinerario, que incluya la localización y el orden de cada punto de toma que hay que servir. Además cada conductor de camión debería mantener un libro de itinerario. El conductor utilizará el libro de itinerario para comprobar la localización y control. También es un lugar conveniente para registrar cualquier problema de control. La información contenida en el libro de itinerario es útil para modificar los itinerarios de recolección.

8.5 TÉCNICAS ALTERNATIVAS PARA EL ANÁLISIS DE SISTEMAS DE RECOLECCIÓN

El interés por el análisis de los sistemas de recolección de residuos sólidos crece por el deseo de mejorar (optimizar) la operación de los sistemas existentes, y de desarrollar los datos y las técnicas que se pueden utilizar para diseñar o evaluar sistemas nuevos y futuros. En el pasado y actualmente, el diseño y

operación de la mayoría de los sistemas operativos sobre residuos sólidos se basan en gran parte en la experiencia y la intuición. En un esfuerzo por hacer funcionar los sistemas existentes y diseñar más eficazmente nuevos sistemas, en ocasiones se ha aplicado al análisis de la recolección de residuos la investigación operativa, la simulación de sistemas, y la modelización de operaciones [2, 3, 6]. Una de las razones principales para que no se hayan utilizado más ampliamente estas técnicas es el enorme coste asociado a la recolección y el procesamiento de datos de trabajo de campo. Un acercamiento novedoso al diseño de itinerarios combina una base de datos de información de recolección con un sistema de información geográfica que contiene datos de mapas de calles.

8.6 TEMAS DE DEBATE Y PROBLEMAS

- 8.1. Conduzca, camine o pedalee por su comunidad e identifique los tipos principales de sistemas y equipamientos utilizados para la recolección de residuos sólidos domésticos y comerciales. Seleccione dos de los sistemas más comunes y cronometre las diversas actividades asociadas a la recolección de residuos. ¿Cómo pueden compararse sus datos con los datos presentados en este capítulo? Si sus datos son significativamente diferentes, explique por qué.
- 8.2. Conduzca, camine o pedalee por su comunidad e identifique los tipos principales de servicios y equipamientos utilizados para la recolección de residuos separados en origen procedentes de fuentes domésticas y comerciales.
- 8.3. ¿Cómo se recogen los residuos de jardín (por ejemplo, recortes de césped, matorral y recortes de árboles) en su comunidad? Si su comunidad no recoge separadamente los residuos de jardín, ¿es factible la recolección por separado de residuos de jardín, dado el sistema de gestión de residuos actualmente utilizado? ¿Qué modificaciones serían necesarias si se fuera a implantar la recolección por separado de los residuos de jardín? Si su comunidad recoge los residuos de jardín separadamente, describa la operación en términos de sus operaciones básicas (por ejemplo, toma, transporte, tiempo en el lugar de descarga, etc.).
- 8.4. Determine las constantes de evacuación de transporte a y b para los siguientes datos (A, B o C seleccionados por su instructor).

Velocidad media de transporte (v) km/h	Distancia de transporte ida y vuelta (x), km/viaje		
	A	B	C
16	1,5	1,6	1,8
32	4,7	5,0	7,4
40	6,4	7,7	12,9
47	8,9	10,5	25,7
48	9,7	11,3	33,8
56	12,9	16,9	
63	16,1	25,7	
64	17,7	32,2	
72	25,0		
80	45,1		

- 8.5. Usted es el ingeniero municipal en una pequeña ciudad rural. Durante una reunión del ayuntamiento le piden a usted que compare el método de recolección con vehículos satélites el servicio más tradicional de recolección en acera y callejón, que la ciudad proporciona actualmente. Sorprendido, porque se había dormido durante el debate anterior de cuatro horas acerca de la conveniencia del lema de la ciudad, usted intenta sintetizar sus pensamientos. ¿Cuáles son algunas de las consideraciones más importantes que usted tiene que exponer en su argumentación?
- 8.6. Desarrolle una ecuación similar a aquellas presentadas en este capítulo que se pueda utilizar para determinar los requisitos laborales para un sistema de caja fija empleando vehículos satélite de recolección (ver Figura 8.2).
- 8.7. Desarrolle una expresión similar a la Ecuación (8.13) que se pueda utilizar para estimar el tiempo necesario para la recolección en acera de residuos separados en origen. Suponga que se aplican las siguientes condiciones:
- Serán utilizados tres contenedores separados para (i) papel mezclado, (ii) plásticos y vidrios no seleccionados, y (iii) latas de hojalata y aluminio no seleccionadas.
 - Algunos residentes, periódicamente, dejarán cartón para una recolección por separado.
- 8.8. Por una diferencia de opinión entre los miembros de la plantilla de la ciudad, usted ha sido requerido como consejero externo para evaluar la operación de recolección en la ciudad de Davisville. La cuestión básica se centra en la cantidad de tiempo transcurrido en actividades de tiempo muerto por parte de los recolectores. Los recolectores dicen que pasan menos del 15 por 100 del día laboral de 8 horas en actividades de tiempo muerto; la dirección dice que este tiempo es más del 15 por 100. A usted le dan la siguiente información, que ha sido verificada por ambas partes, recolectores y dirección:
- Se utiliza un sistema de contenedor, sin intercambio de contenedor.
 - El tiempo medio de conducción desde el garaje hasta el primer contenedor es de 20 min., y no se produce ninguna actividad de tiempo muerto.
 - El tiempo medio de toma por contenedor es 6 min.
 - El tiempo medio de conducción entre contenedores es 6 min.
 - El tiempo medio requerido para vaciar el contenedor en el lugar de evacuación es 6 min.
 - La distancia media de un viaje de ida y vuelta al lugar de evacuación es 10 mi/viaje, y las constantes de la ecuación ($a + bx$) son $a = 0,004$ h/viaje y $b = 0,02$ h/min.
 - El tiempo requerido para depositar un contenedor después de vaciarlo es 6 min.
 - El tiempo medio transcurrido en conducir desde el último contenedor hasta el garaje municipal es 15 min. y no se produce ninguna actividad de tiempo muerto.
 - El número de contenedores vaciados por día es 10.
- Utilizando esta información determine si los recolectores o la dirección tienen razón.
- 8.9. La cantidad de residuos sólidos generados por semana en un gran complejo residencial es de cerca de 460 m^3 . Hay dos contenedores, cada uno tiene una capacidad de 150 l, detrás de cada casa. Los residuos sólidos son recogidos por una plantilla de dos operarios que utilizan un camión compactador de 25 m^3

cargado manualmente. Determine el tiempo por viaje y las necesidades semanales de mano de obra en días-persona. El lugar de evacuación está localizado a 15 km; las constantes de tiempo de transporte a y b son 0,022 h/viaje y 0,022 h/km, respectivamente; el factor de utilización de contenedor es 0,7 y la relación de compactación es 2. Suponga que la recolección se basa en una jornada de 8 h.

8.10. Una ciudad desea determinar el impacto de una nueva urbanización sobre los servicios de recolección de residuos. La urbanización añadirá 150 casas. Una plantilla de dos operarios recogerá los residuos dos veces por semana, utilizando camiones compactadores cargados manualmente de 24 m³. El tamaño de contenedor permisible es de 0,14 m³. Se estima que habrá 3,2 personas por vivienda y que cada persona desechará 2,5 kg de residuos diariamente. Determine el número de contenedores necesarios por vivienda, el factor medio de utilización de contenedor, y las necesidades semanales de mano de obra en personas-días. La relación de compactación del vehículo de recolección es 2,5, la densidad media de los residuos sólidos en contenedores es 120 kg/m³, el lugar de evacuación está localizado a 25 km, y las constantes del tiempo de transporte a y b son 0,08 h/viaje y 0,015 h/km respectivamente. La recolección transcurre durante una jornada de 8 horas. La recolección es en acera, excepto para las personas mayores (5 por 100) que reciben servicio de patio.

8.11. Están a punto de ocupar una nueva zona residencial compuesta de 800 casas aisladas. Suponiendo que se van a realizar dos o tres viajes por día al lugar de evacuación, diseñe el sistema de recolección y compare dos alternativas. Se aplican los siguientes datos:

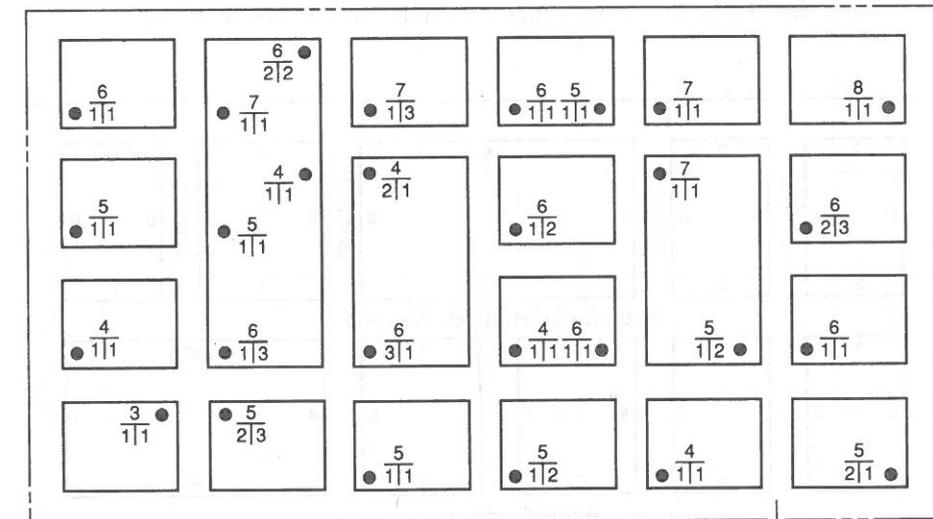
- a) Tasa de generación de residuos sólidos: 0,024 m³/casa · día.
- b) Contenedores por servicio: 2.
- c) Tipo de servicio: 75 por 100 en acera y 25 por 100 detrás de la casa.
- d) Frecuencia de recolección: una vez por semana.
- e) El vehículo de recolección es un compactador de carga trasera con una relación de compactación de 2,5.
- f) Duración del día laboral: 8 h.
- g) Número de operarios: 2.
- h) Distancia de transporte ida y vuelta: 20 mi.
- i) Constantes de transporte: $a = 0,08$ h/viaje y $b = 0,025$ h/mi.
- j) Tiempo en el lugar de descarga, por viaje: 0,083 h/viaje.

8.12. La Corporación TT & E tiene cuatro locales de negocios, cada uno de los cuales está convenientemente localizado a 5 min. uno de otro y a 5 min. del lugar de evacuación. TT & E utiliza actualmente un sistema convencional con grandes contenedores abiertos. Se ha sugerido a TT & E la posibilidad de ahorrarse dinero alquilando un quinto contenedor de la compañía de recolección de residuos a un coste de 120 \$/mes, y cambiando el sistema al modo de intercambio de contenedores (ver Figura 8.14b). Se servirá a cada local 8 veces por mes. El quinto contenedor será almacenado en el garaje de la compañía de recolección. Suponiendo que los costes de operación son 20 \$/h, calcule los costes de ambos sistemas. ¿Es una decisión sabia por parte de TT & E alquilar el quinto contenedor? Suponga que $a = 0,034$ h/viaje y $b = 0,029$ h/mi. en ambos casos. Explique claramente cualquier suposición.

8.13. Usted y su amigo están buscando un trabajo de media jornada. Viven en una pequeña comunidad rural que no recibe ningún servicio regular de recolección de residuos. Su amigo piensa que sería una buena idea proporcionar un servicio de recolección de residuos utilizando una camioneta nueva 4 · 4 de 3/4 de tone-

laje. Hay 30 casas, y cada una utiliza dos contenedores de 120 l. Todas las casas recibirían un servicio de recolección en la parte trasera una vez por semana. Las constantes de transporte son 0,08 h/viaje y 0,025 h/mi. Suponga que el tiempo en el lugar de descarga es 0,5 h. La distancia de transporte ida y vuelta al lugar de evacuación es 32 mi. El tamaño de caja de la camioneta es 6 · 8 · 3. Suponiendo que trabajando juntos, usted y su amigo pueden dedicar 10 h/semana a este proyecto. ¿Es operacionalmente factible?

- 8.14. Usted tiene que presentar una propuesta para evaluar la operación de recolección de residuos sólidos en la Universidad. Prepare una propuesta, en forma general, para presentar en la Universidad. Hay que resaltar claramente las divisiones de tareas más importantes en que sería dividido el esfuerzo de trabajo. Basándose en sus conocimientos hasta la fecha, estime las personas-equipos de trabajo que serían necesarias para hacer el trabajo diseñado en su propuesta. Utilice una forma generalizada para contestar a esta pregunta.
- 8.15. Trace itinerarios de recolección para un sistema de recolección con contenedor y para un sistema con caja fija de la zona industrial mostrada en el mapa adjunto. Hay un total de 28 puntos de toma y 35 contenedores. La cantidad total de residuos que hay que recoger cada semana es 220 m³. Utilizando una escala arbitraria, determine la distancia viajada durante la operación de recolección en cada itinerario para cada sistema de recolección. El mapa y la información que contiene sería preparado como un primer paso en el trazado de itinerarios de recolección. Suponga que se aplican los siguientes datos:



RS Cantidad de residuos sólidos, m³/contenedor
 NF { N Número de contenedores
 F Frecuencia de recogida, veces/semana
 A estación de transferencia, IRM o lugar de evacuación

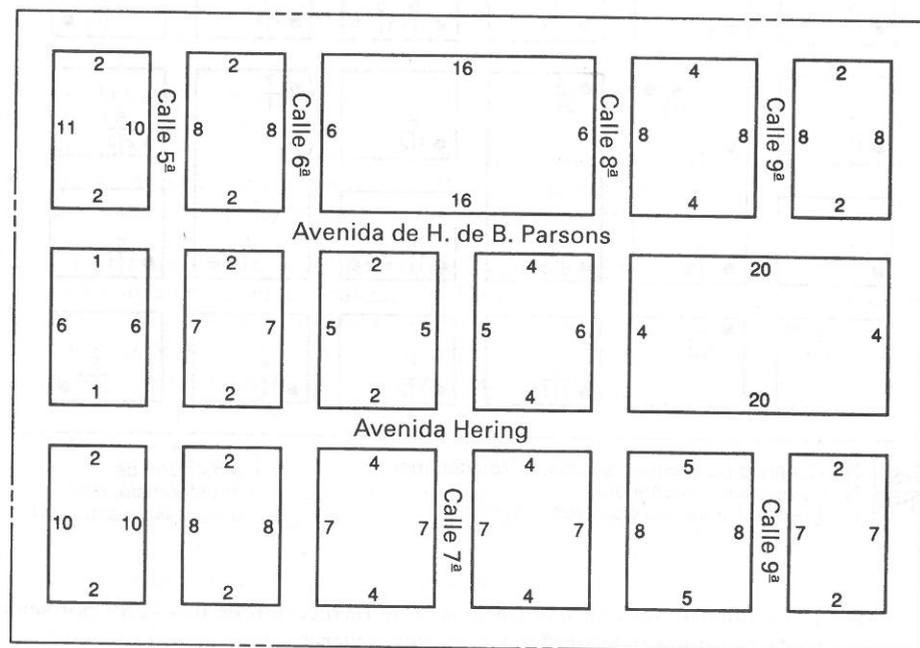
- a) Los contenedores con una frecuencia de recolección de dos veces por semana tienen que ser recogidos los martes y viernes.
- b) Los contenedores con una frecuencia de recolección de tres veces por semana tienen que ser recogidos los lunes, miércoles y viernes.

- c) Se pueden recoger los contenedores a partir de cualquier lado dentro de la intersección en que están localizados.
- d) El sistema de contenedor es del tipo en el que se devuelven los contenedores vacíos al mismo lugar donde fueron recogidos llenos (ver Figura 8.14a).
- e) Para ambos sistemas de recolección se proporcionará un servicio de recolección de lunes a viernes, ambos incluidos, cuando sea necesario.
- f) Para el sistema de contenedor, el vehículo de recolección será un compactador autocarga con una capacidad de 25 m³ y una relación de compactación de 2,8.

8.16. Trace itinerarios de recolección para la zona residencial mostrada en la siguiente figura. Suponga que se aplican los siguientes datos:

- a) Ocupantes por vivienda: 3,1.
- b) Tasa de generación de residuos sólidos: 1,75 kg/cápita · día.
- c) Frecuencia de recolección: una vez/semana.
- d) Tipo de servicio de recolección: acera.
- e) Número de operarios: 1 persona.
- f) Capacidad del vehículo de recolección: 20 m³.
- g) Peso específico compactado de residuos sólidos en el vehículo de recolección: 350 kg/m³.

8.17. Trace itinerarios de recolección para la zona mostrada en la figura dada en el Problema 8.16 utilizando los datos del Problema 8.16, suponiendo que las calles Quinta y Octava son de un sentido Sur-Norte y que la calle Sexta es de sentido Norte-Sur. Todas las demás calles y avenidas son de dos sentidos.

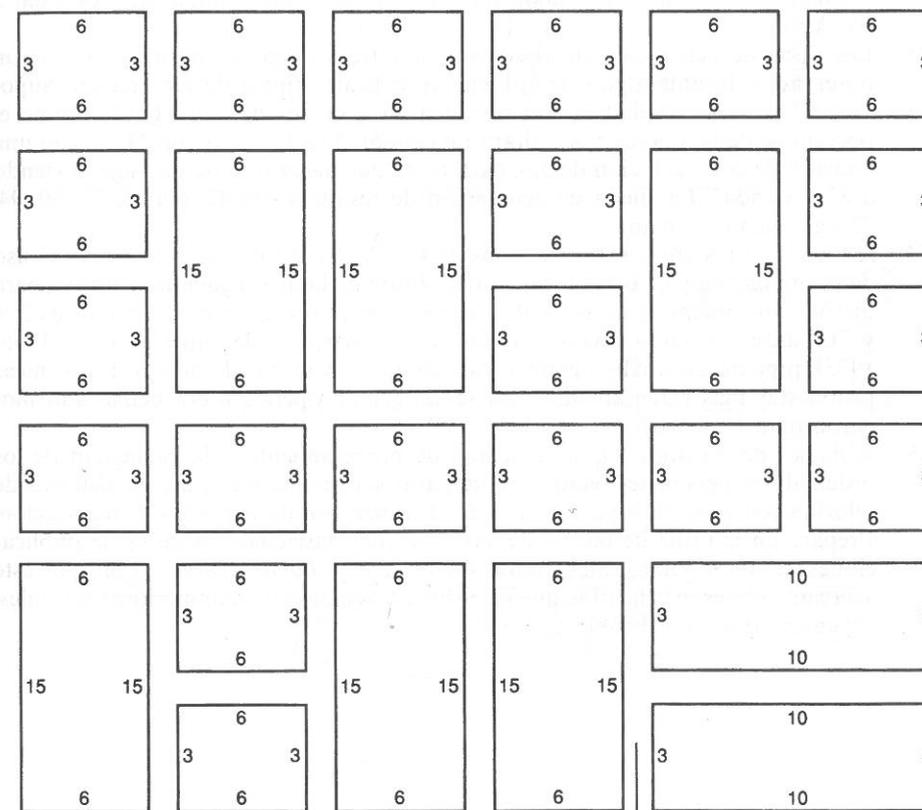


3, 6, 10, 15 = Número de residentes en cada manzana

8.18. Trace itinerarios de recolección para la zona mostrada en la figura dada en el Problema 8.16 utilizando los datos dados en el Problema 8.16, suponiendo que la Avenida H. de B. Parsons es de sentido Oeste-Este, y que la Avenida Hering es de sentido Este-Oeste. Todas las demás calles son de dos sentidos.

8.19. Trace itinerarios de recolección para la zona residencial mostrada en la siguiente figura. Suponga que se aplican los siguientes datos:

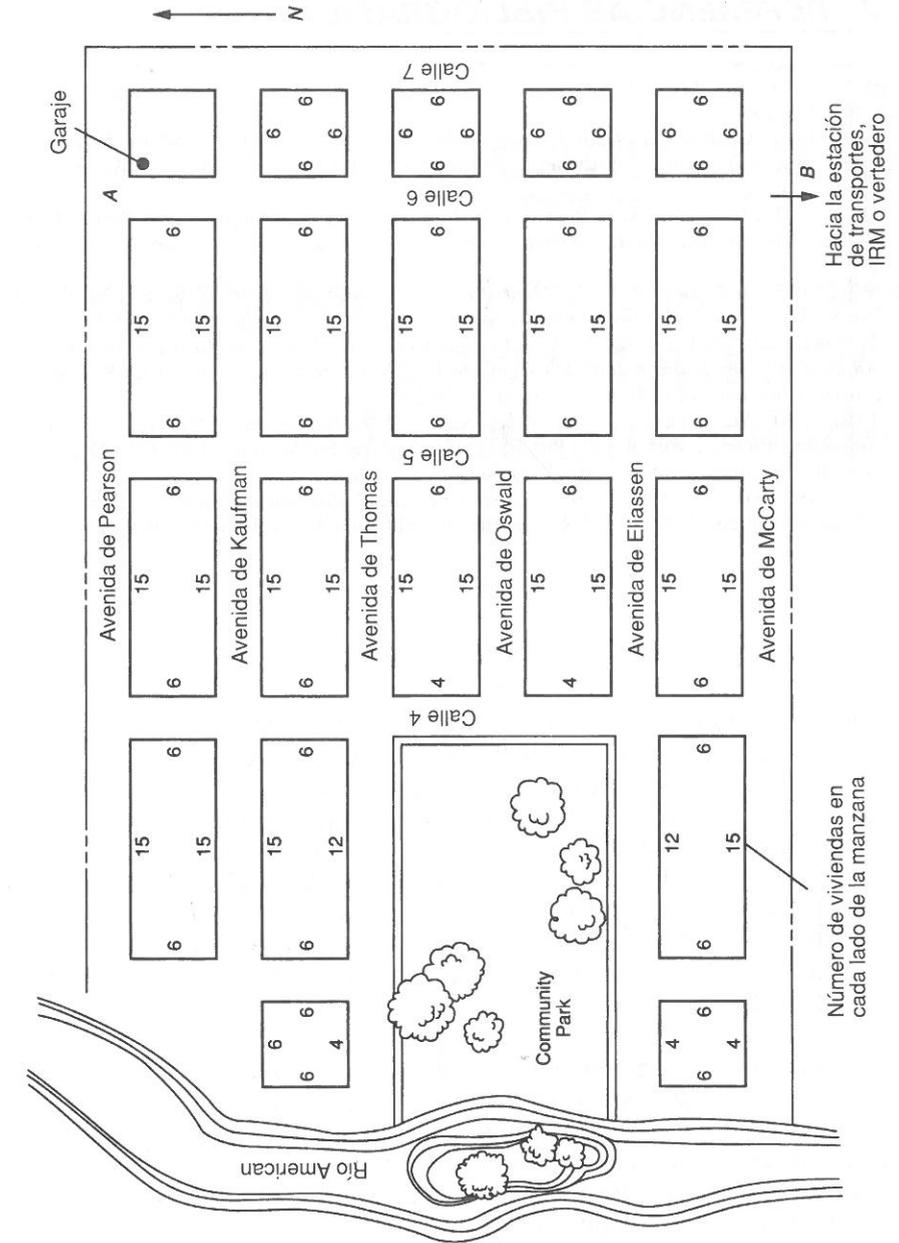
- a) Ocupantes por vivienda: 2,8.
- b) Tasa de generación de residuos: 1,6 kg/cápita · día.
- c) Frecuencia de recolección: 1 vez/semana.
- d) Tipo de servicio de recolección: acera.
- e) Número de operarios: 1 persona.
- f) Capacidad del vehículo de recolección: 18 m³.
- g) Peso específico de residuos sólidos compactados en el vehículo de recolección: 385 kg/m³.
- h) Recolección en cada lado de la calle utilizando un vehículo de recolección con volante a la derecha y conducción de pie
- i) En las calles no se puede girar en U.



3, 6, 10, 15 = Número de residentes en cada manzana

Hacia la estación de transferencia, IRM o lugar de evacuación

- 8.20. Solucione el Problema 8.19 utilizando un vehículo de recolección con una capacidad de 15 m^3 , suponiendo que el peso específico compactado es igual a 340 kg/m^3 .
- 8.21. Trace itinerarios de recolección para la zona residencial mostrada en la Figura de la página 277. Suponga que se aplican los siguientes datos:
- Ocupantes por vivienda: 3,1.
 - Tasa de generación de residuos sólidos: $1,7 \text{ kg/cápita} \cdot \text{día}$.
 - Frecuencia de recolección: 1 vez/semana.
 - Tipo de servicio de recolección: acera.
 - Número de operarios: 1 persona.
 - Capacidad del vehículo de recolección: 23 m^3 .
 - Peso específico de residuos sólidos compactados en el vehículo de recolección: 370 kg/m^3 .
 - Recolección en cada lado de la calle utilizando un vehículo con volante a la derecha y conducción de pie.
 - En las calles no se puede girar en U.
- 8.22. Solucione el Problema 8.21 utilizando un vehículo de recolección con una capacidad de 18 m^3 suponiendo que el peso específico compactado es igual a 350 kg/m^3 .
- 8.23. Las tasas de generación de residuos domésticos dadas a continuación fueron observadas durante algún tiempo en un itinerario típico de recolección. Suponiendo que la densidad de los residuos en acera es de 120 kg/m^3 , estime el porcentaje de tiempo que necesitará un camión de recolección de 24 m^3 con una relación de compactación de 2,5, para tener que hacer más de un viaje sirviendo a 82 viviendas. Las tasas de generación de residuos son 42, 60, 35, 27, 50, 94, $72 \text{ kg/vivienda} \cdot \text{semana}$.
- 8.24. A finales de los años 60 y principios de los 70 se escribía mucho acerca del uso de la simulación y de otras técnicas del campo de la investigación operativa para diseñar los itinerarios de vehículos de recolección (por ejemplo, Referencias 3, 4 y 7). Basándose en la revisión de uno o dos artículos de aquel período (1965-1975), prepare un análisis explicando por qué no se han adoptado las técnicas propuestas más extensamente. ¿La investigación operativa era demasiado moderna para la época?
- 8.25. A finales de los años 80, la velocidad de procesamiento y la capacidad de los ordenadores personales relativamente baratos hizo factible el uso de sistemas de información geográfica para el trazado de itinerarios de vehículos de recolección. Prepare un informe de tales sistemas utilizando fascículos recientes de publicaciones sobre el tema, tales como *Waste Age* y *Public Works*. ¿Por qué este acercamiento es más factible que las técnicas basadas en computadoras centrales, argumentadas en el Problema 8.24?



8.7 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. BERGEN COUNTY UTILITIES AUTHORITY: *Bergen County Apartment Recycling Manual*, Little Ferry NJ, 1988.
2. LIEBMAN, J. C.: *Routing of Solid Waste Collection Vehicles*, Final Report on Project 801289, Office of Research and Monitoring, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, 1973.
3. QUON, J. E.; CHARNES, A., y WENSON, S. J.: Simulation and Analysis of a Refuse Collection System, *Proceedings ASCE, Journal of the Sanitary Engineering Division*, Vol. 91, N.º SA5, 1965.
4. SHUSTER, K. A., y SCHUR, D. A.: *Heuristic Routing for Solid Waste Collection Vehicles*, Publication SW-113, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, 1974.
5. TCHOBANOGLIOUS, G., y KLEIN, G.: *An Engineering Evaluation of Refuse Collection Systems Applicable to the Shore Establishment of the U.S. Navy*, Sanitary Engineering Research Laboratory, University of California, Berkeley, 1962.
6. TRUITT, M. M.; LIEBMAN, J. C., y KRUSE, C. W.: *Mathematical Modeling of Solid Waste Collection Policies*, vols. 1 y 2, Public Health Service Publication 2030, U.S. Department of Health, Education, and Welfare, Washington, DC, 1970.
7. UNIVERSITY OF CALIFORNIA: *An Analysis of Refuse Collection and Sanitary Landfill Disposal*, Technical Bulletin 8, Series 37, University of California Press, Berkeley, 1952.

CAPITULO 9

Separación y procesamiento y transformación de residuos sólidos

El propósito de este capítulo es presentar al lector los temas de recuperación de materiales separados, de separación y procesamiento de componentes de residuos sólidos, y de los procesos de transformación utilizados para alterar la forma de los residuos y para recuperar productos útiles. La separación y procesamiento y transformación de materiales residuales forman el cuarto de los elementos funcionales. Como los múltiples detalles asociados al diseño e implantación de procesos unitarios e instalaciones utilizadas para la separación, procesamiento y transformación de materiales residuales impedirían la presentación de estos importantes temas, se han agrupado los detalles de diseño y son presentados en la Parte IV, en los Capítulos 12 a 15, ambos incluidos.

Los métodos utilizados actualmente para recuperar los materiales residuales separados en origen incluyen la recogida en acera y la entrega voluntaria de materiales separados, por parte de los residentes, a centros de recogida selectiva y de recompra. La separación y procesamiento adicional de residuos que han sido separados en origen, así como la separación de residuos no seleccionados normalmente se produce en *instalaciones de recuperación de materiales (IRM)* o en grandes *instalaciones de recuperación/transferencia de materiales (IR/TM)* integradas. Las IR/TM integradas pueden incluir las funciones de un centro de recogida selectiva para residuos separados, una instalación de separación de materiales, una instalación para el compostaje y bioconversión de residuos, una instalación para la producción de combustible derivado de residuos, y una instalación de transferencia y transporte.