

Intervenciones priorizadas en plantas de manejo de residuos sólidos mediante la aplicación del análisis estructural¹

Prioritized Interventions in Solid-Waste Management Plants through Structural Analysis²

Intervenções priorizadas em usinas de manejo de resíduos sólidos mediante a aplicação da análise estrutural³

Édgar Ricardo Oviedo-Ocaña⁴
Luis Fernando Marmolejo-Rebellón⁵
Patricia Torres-Lozada⁶

¹ Fecha de recepción: 1 de septiembre de 2010. Fecha de aceptación: 17 de febrero de 2011. Este artículo se deriva del proyecto de investigación denominado *Estrategias para el mejoramiento de opciones tecnológicas de aprovechamiento de residuos sólidos en cabeceras municipales del Valle del Cauca menores a 20.000 habitantes*, con visión de sostenibilidad (número de proyecto 2524), registrado en la Vicerrectoría de Investigaciones, Universidad del Valle, Cali, Colombia, desarrollado por el grupo de investigación Estudio y Control de la Contaminación Ambiental (ECCA), de la misma universidad.

² Submitted on September 1, 2010. Accepted on February 17, 2011. This article is derived from the research project *Strategies for Improving Technological Options geared towards a Better and Sustainable Use of Solid Waste in Municipal Seats of Valle del Cauca with Populations not larger than 20,000*, registration number 2524, developed by the research group Study and Control of Environmental Contamination (ECCA) from the Universidad del Valle, Cali, Colombia.

³ Data de recepção: 1 de setembro de 2010. Data de aceitação: 17 de fevereiro de 2011. Este artigo deriva do projeto de pesquisa denominado *Estratégias para o melhoramento de opções tecnológicas de aproveitamento de resíduos sólidos nos municípios do Valle de Cauca menores a 20.000 habitantes, com visão de sustentabilidade* (número do projeto 2524), registrado na Vice-reitoria de pesquisas, Universidad del Valle, Cali, Colômbia, desenvolvido pelo grupo de pesquisa Estudo e Controle da Poluição Ambiental (ECCA), da mesma universidade.

⁴ Ingeniero sanitario, Universidad del Valle, Cali, Colombia. Magíster en Administración de Salud, Universidad del Valle. Estudiante del Doctorado en énfasis Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Universidad del Valle. Correo electrónico: edoviedo@univalle.edu.co.

⁵ Ingeniero sanitario, Universidad del Valle, Cali, Colombia. Magíster en Administración de Salud, Universidad del Valle. Estudiante del Doctorado en énfasis Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Universidad del Valle. Correo electrónico: lufermar@univalle.edu.co.

⁶ Ingeniera sanitaria, Universidad del Valle, Cali, Colombia. Magíster en Ingeniería Civil, Hidráulica y Saneamiento, Universidad de São Paulo, Brasil. Doctora en Ingeniería Hidráulica y Saneamiento, Universidad de São Paulo. Correo electrónico: patoloz@univalle.edu.co.

Resumen

En Colombia, el aprovechamiento de los residuos sólidos municipales y la reincorporación de materiales al ciclo productivo se realiza en unidades productivas denominadas *plantas de manejo de residuos sólidos* (PMRS), usuales en municipios menores. Para su sostenibilidad es fundamental identificar qué elementos condicionan la materia prima, sus procesos y sus productos. En este artículo se analizan cinco PMRS del Valle del Cauca, Colombia, en las cuales se identificaron 18 variables relacionadas con su funcionamiento. Con el análisis estructural se estableció que elementos externos a las PMRS (generación de residuos sólidos municipales y prácticas de manejo, como separación, almacenamiento y presentación de los residuos) condicionan la calidad y la cantidad de las materias primas. La intervención en estos elementos mejoraría el diseño de las plantas, optimizaría la operación de sus procesos, incrementaría la calidad de los productos y disminuiría los rechazos. Ello incluye la formulación y adaptación de metodologías para caracterizar los residuos y el estímulo a los usuarios para su separación en la fuente, la adaptación de las tecnologías al contexto local y la capacitación a operarios y el entrenamiento a profesionales que participan en la selección, diseño, operación y monitoreo de las tecnologías.

Palabras clave

Aprovechamiento de residuos, teoría de las estructuras, plantas para tratamiento de residuos.

Abstract

In Colombia, materials recovery in municipal solid wastes (MSW) and their reincorporation into the productive cycle have been carried out in productive units known as material recovery facilities (MRFs), which have been implemented especially on small municipalities. The effectiveness of MRFs has been questioned. In order for them to be sustainable, it is important to identify the aspects that influence the raw materials, processes and products of these productive units. As a reference, this work takes five MRFs in Valle del Cauca, Colombia, where 18 variables related to the system performance were identified. The structural analysis allowed the identification of factors external to the MRFs, such as the generation of MSW, as well as a number of practices such as classification, storage, and waste presentation. They have an impact on the quality and quantity of raw materials. Work on these key elements will make it possible to improve the design of facilities, will optimize process operation, will increase the quality of the products and will reduce rejections. Prioritized interventions to improve performance in MRFs include the formulation and adaptation of methodologies to characterize the MSW, the promotion of solid waste segregation at the source for the users, the implementation of technologies adapted to the local context, and the training of operators and professionals involved in the selection, design, operation and monitoring of technologies.

Key words

Waste utilization, theory of structures, waste treatment plants.

Resumo

Na Colômbia, o aproveitamento dos resíduos sólidos municipais e a reincorporação de materiais ao ciclo produtivo é realizado em unidades produtivas denominadas *usinas de manejo de resíduos sólidos* (PMRS), usuais em municípios menores. Para sua sustentabilidade é fundamental identificar que elementos condicionam a matéria prima, seus processos e seus produtos. Neste artigo são analisadas cinco PMRS do Valle del Cauca, Colômbia, nas quais foram identificadas 18 variáveis relacionadas com seu funcionamento. Com a análise estrutural estabeleceu-se que elementos externos às PMRS (geração de resíduos sólidos municipais e práticas de manejo, como separação, armazenagem e apresentação dos resíduos) condicionam a qualidade e a quantidade das matérias primas. A intervenção nestes elementos melhoraria o desenho das usinas, otimizaría a operação de seus processos, aumentaria a qualidade dos produtos e diminuiria a oposição. Isso inclui a criação e adoção de metodologias para caracterizar os resíduos e o estímulo aos usuários para sua separação na fonte, a adaptação das tecnologias ao contexto local e a capacitação de operários e o treinamento a profissionais que participam na seleção, desenho, operação e monitorio das tecnologias.

Palavras chave

Aproveitamento de resíduos, teoria das estruturas, usinas de tratamento de resíduos.

Introducción

El aprovechamiento de los residuos sólidos municipales (RSM) es una alternativa para reincorporar materiales al ciclo productivo y reducir la cantidad de residuos de los que se va a disponer (Mbuligwe et al., 2002; Ketlogetswe y Mothudi, 2005). Ello se reconoce como clave para alcanzar los objetivos de un desarrollo sostenible, a fin de contribuir a reducir los efectos sobre el medio ambiente y aumentar el rendimiento de los recursos (Naciones Unidas, 2002).

En Colombia, la Política Nacional sobre Gestión Integral de Residuos Sólidos (Minambiente, 1997) ubica el aprovechamiento como primera opción para la gestión de los residuos generados. Este lineamiento se ha materializado por medio de la implementación de plantas de manejo de residuos sólidos (PMRS), las cuales pasaron de 34 a 59 entre 2006 y 2008 (MAVDT, 2009). Además, en los municipios menores (inferiores a 20.000 habitantes) es donde se ha implementado con mayor frecuencia (SSPD, 2008).

Las PMRS son unidades productivas cuyas materias primas son los RSM que se procesan a fin de obtener productos con estándares de calidad que permitan reincorporarlos en otros procesos productivos. Incluyen dos líneas de producción: el aprovechamiento de biorresiduos y el de materiales reciclables, además de un área para disposición final de los materiales no aprovechables. Como en toda unidad productiva, su efectividad está asociada con elementos, como las materias primas, los procesos y los productos. Estudios desarrollados en Colombia (SSPD, 2008; DPN, 2008; Univalle, 2010) muestran que estos componentes no se han estudiado lo suficiente para su implementación, y esta es una de las razones para que la efectividad de las PMRS se cuestione (MAVDT, 2006; SSPD, 2008; SSPD, 2009).

A pesar de las limitaciones de las PMRS, factores como la reducción de costos de transporte y disposición en rellenos regionales, la disminución de los requerimientos de espacio para la disposición final y de sus impactos ambientales, la generación de oportunidades laborales y la existencia de mercados potenciales

para los productos justifican el impulso de acciones para fortalecer su sostenibilidad. Por ello es fundamental identificar y establecer las variables que mayor influencia tienen en su funcionamiento.

El análisis estructural es una técnica para priorizar acciones que permitan abordar un sistema con una mirada acorde con la realidad y con las dinámicas relacionales entre las variables (Restrepo, 2001). Concibe el objeto de estudio como un sistema de variables estrechamente vinculadas entre sí, de modo que la acción ejercida sobre una de ellas repercute en los restantes directa e indirectamente. Por medio de esta herramienta se logran detectar las variables clave, es decir, aquellas que ejercen la mayor influencia sobre las restantes; de esta forma, actuando sobre las variables clave se actúa directa e indirectamente en las demás (Castellanos et al., 2007).

En este artículo se utiliza el análisis estructural como herramienta para jerarquizar las variables con mayor influencia y dependencia en el funcionamiento de las PMRS, al clasificarlas en las relacionadas con la materia prima, los procesos y los productos. Para ello se toma como referencia información sobre el funcionamiento de cinco PMRS del departamento del Valle del Cauca. Este análisis es un punto de partida para formular intervenciones que permitan abordar de manera estructurada las limitaciones de las PMRS y contribuir a su sostenibilidad.

1. Metodología

1.1 Identificación de variables que condicionan el funcionamiento de las PMRS

Para identificar las variables se realizaron visitas a las PMRS en las que mediante técnicas de observación e inspección se identificaron aspectos de la operación, como: (a) cantidad y calidad de la materia prima, (b) características de los procesos y (c) calidad y cantidad de productos. Así mismo, se revisaron los criterios empleados para la selección de las tecnologías, el diseño y el funcionamiento de cinco PMRS del Valle del Cauca (Alcalá, Bolívar, El Dovio, La Victoria y Versalles) en documentos técnicos municipales y departamentales. La información se complementó con un taller con representantes de cada PMRS en el que se presentaron las condiciones actuales de operación de cada sistema. El análisis y discusión de esta información permitió identificar los elementos y variables que condicionan el funcionamiento de las plantas. Estas variables fueron caracterizadas con información reportada sobre el aprovechamiento de residuos en las PMRS.

1.2 Análisis de las variables que condicionan el funcionamiento de las PMRS

Se aplicó la técnica de análisis estructural, utilizando la Matriz de Impacto Cruzado-Multiplicación Aplicada a una Clasificación (MICMAC), que permite identificar las principales variables influyentes y dependientes y, en consecuencia, las esenciales para la evolución futura de la PMRS. Las relaciones de influencia y dependencia entre las variables identificadas fueron ponderadas, asignándose una puntuación para el grado de influencia y dependencia de acuerdo con lo planteado por Aponte (2005) y Restrepo (2001). Posteriormente, se graficaron en un plano cartesiano los valores de dependencia (eje X) e influencia (eje Y) para cada variable y se estableció el eje de coordenadas empleando la ecuación (1).

$$X=Y= [(\text{mayor valor de la influencia} + \text{mayor valor de la dependencia}) / 2] / 3 \quad (1)$$

Los cuadrantes se interpretaron siguiendo las recomendaciones planteadas por Restrepo (2001), Aponte (2005) y Castellanos et al. (2007), utilizando las siguientes denominaciones: *cuadrante I* (zona de poder), donde se localizan variables con alta influencia y baja dependencia; *cuadrante II* (zona de trabajo), en que se localizan variables con alta influencia y dependencia; *cuadrante III* (zona de resultados), donde se localizan variables con baja influencia y alta dependencia; *cuadrante IV* (variables autónomas), en que se localizan las variables con poca influencia y dependencia.

1.3 Intervenciones priorizadas para mejorar el funcionamiento de las PMRS

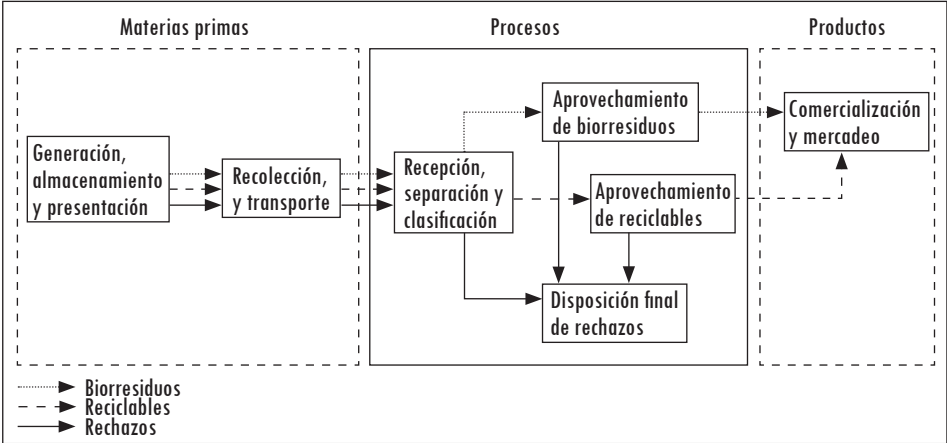
Los resultados obtenidos en la MICMAC facilitaron el análisis del sistema y permitieron establecer las variables que requieren una intervención prioritaria para mejorar el funcionamiento de todo el sistema. Para estas variables clave se formularon intervenciones sustentadas con información reportada en la literatura. Las estrategias fueron presentadas, discutidas y ajustadas con los representantes de las cinco PMRS.

2. Resultados y discusión

La Figura 1 presenta los componentes estudiados de la unidad productiva (materias primas, procesos y productos) y los elementos relacionados con cada uno de estos. La materia prima está condicionada por la cantidad de RSM generada; las prácticas de separación, almacenamiento y presentación de los residuos, y las características de recolección y transporte. Los procesos incluyen tanto la recepción y acondicionamiento de la materia prima como las

dos líneas de producción. En el caso de los productos se analizaron las variables relacionadas con su comercialización y mercado.

Figura 1. Elementos de la PMRS que integran los componentes de la unidad productiva



Fuente: presentación propia de los autores.

2.1 Identificación de variables que condicionan el funcionamiento de las PMRS

2.1.1 Materias primas

- a. *Generación.* En cualquier proceso productivo se requiere conocer la cantidad y características de la materia prima; en este caso, la cantidad de RSM generados. Para ello, deben desarrollarse programas de caracterización de los residuos sólidos, que son el punto de partida para proyectar el funcionamiento de las PMRS (Díaz et al., 2007; Sharma y McBean, 2007), suministrando información para estimar la cantidad de materiales potencialmente recuperables y facilitar el diseño de equipos de procesamiento (Gidarakos et al., 2006). Tal como lo reportan Klinger et al. (2009) para Colombia, en las PMRS estudiadas la información reportada de caracterización y muestreo de los RSM no incluye los métodos empleados para su determinación ni las estrategias instituidas para el trabajo de campo; además, las categorías propuestas son insuficientes para el diseño de equipos y estimación de las cantidades que se van a comercializar, como en el caso del plástico, que se clasifica por tipo de polímero y proceso de elaboración. De esta manera, se encontró que se puede aprovechar sólo una fracción de esta categoría.

- b. *Almacenamiento y presentación.* Las prácticas de almacenamiento por parte del generador inciden en la calidad y cantidad de materia prima. Este puede manejar los materiales como residuos (algo que puede ser utilizado por otros) o como basura (lo que se tira, porque no tiene utilidad). Del mismo modo, decide cómo, cuándo y dónde presentar sus residuos a los servicios de recolección y transporte (Marmolejo et al., 2010a).

Para facilitar el funcionamiento de los procesos y la valorización de los materiales en el mercado, es necesario arraigar prácticas de separación en la fuente que promuevan la preservación de las características de la materia prima, minimicen su mezcla y eviten su contaminación. En el caso de los biorresiduos, contribuye con la obtención de compost de calidad, apto para ser usado en agricultura (Barreira et al., 2006; Hargreaves et al., 2008; Hassen et al., 2001), mientras que en el caso de los materiales reciclables mejora su calidad y facilita su recuperación y procesamiento (Kofoworola, 2007).

En este estudio se identificó que durante la puesta en marcha de las PMRS se realizaron actividades para estimular la separación en la fuente; sin embargo, actualmente son poco desarrolladas. Marmolejo et al. (2010a) reportan para las PMRS de Bolívar, La Victoria y Versalles que una alta proporción de usuarios residenciales mezcla sus residuos en los recipientes de almacenamiento, lo que afecta no sólo la cantidad, sino la calidad de materiales, y así su posible recuperación. Esto coincide con lo reportado en las PMRS del país, donde tan sólo en el 36% recibe materia prima separada en la fuente y en la mayoría de los casos no sobrepasan el 60% de los residuos generados (SSPD, 2008).

- c. *Recolección y transporte.* La calidad y cantidad de la materia prima también está condicionada por la forma como se recolectan y transportan los residuos; por lo tanto, es recomendable que las materias primas separadas en la fuente se recolecten selectivamente y que se disponga de un sistema que establezca un equilibrio capaz de satisfacer a los generadores y operadores del servicio de aseo (Gallardo et al., 2010). Diversos estudios (Barreira et al., 2006; Do Prado Filho y Garcia Sobreira, 2007; Gómez et al., 2008) muestran las dificultades para la implementación de la recolección selectiva y su impacto en el funcionamiento de opciones como el compostaje o el reciclaje. Oviedo (2010) identificó para la PMRS de La Victoria en el Valle del Cauca que una alternativa para la recolección selectiva en la localidad es el acondicionamiento de los vehículos recolectores, con divisiones en la tolva que garanticen la

preservación de los materiales durante su transporte; sin embargo, deben investigarse mecanismos que faciliten el descargue de la materia prima en las plantas.

En este estudio se encontró que la implementación de la recolección selectiva no tuvo continuidad en las PMRS analizadas. Por lo tanto, entre las causas para su poca efectividad se establecieron pocas cantidades de residuos sólidos separados en la fuente, vehículos no adaptados para la recolección separada de los materiales y mínimo conocimiento de elementos técnicos y operativos por parte del personal involucrado.

La Tabla 1 resume las variables identificadas para la materia prima de la unidad productiva.

Tabla 1. Variables relacionadas con la materia prima en las PMRS

Elemento	Núm.	Variable
Generación	1	Cantidad de RSM
Almacenamiento y presentación	2	Aplicación de la separación en la fuente de los RSM
Recolección y transporte	3	Equipos acondicionados para la recolección selectiva
	4	Diseños de los ruteos
	5	Capacitación de personal

Fuente: presentación propia de los autores.

2.1.2 Procesos

- a. *Recepción de las materias primas.* La recepción de materia prima mezclada o separada en la fuente involucra una serie de procesos unitarios. Los detalles de la tecnología y su grado de complejidad están influenciados por la naturaleza y utilidad del material que se va recuperar y el grado de separación en la fuente. En países en desarrollo, la recepción involucra la clasificación manual, que es una labor intensa que genera una porción sustancial de costos de operación (UNEP y CalRecovery, 2005). En las PMRS estudiadas predominan las plataformas (o rampas) para la recepción y clasificación de las materias primas; sin embargo, no se reportan los criterios empleados para su selección y diseño. La separación manual realizada en estas estructuras aumenta el riesgo ergonómico para los operarios y facilita la acumulación y deterioro de la calidad de los materiales, que resultan altamente inefectivas (Marmolejo et al., 2010b).

b. *Transformación de biorresiduos*. En Colombia, los biorresiduos son la proporción más alta de los RSM (MAVDT, 2007), de los cuales el compostaje es una opción considerada ideal para el aprovechamiento de esta fracción (Dulac, 2001). Este se señala como económico comparado con otros tratamientos y eficaz para disminuir la cantidad que se va a disponer (Barreira et al., 2006). En las PMRS analizadas predomina esta opción para el manejo de los biorresiduos; sin embargo, para su aplicación no se incluye un análisis que permita visualizar su viabilidad, el mercado del producto y otros criterios para su implementación. El diseño no consideró variables como cantidad y características de las materias primas, requerimientos de calidad de los productos que satisfagan las condiciones de suelos y cultivos locales, necesidades operacionales y condiciones ambientales. La operación es incipiente, debido a la poca capacitación de los operarios. En las PMRS no se monitorean las principales variables del proceso (pH, temperatura, humedad y rendimiento del proceso y productos). Ello lleva a situaciones como falta de volteos, exceso de agua y estabilización incompleta de la materia orgánica, que incide en la baja calidad del producto y compromete su uso y posibilidad de comercialización.

c. *Manejo de materiales reciclables*. La fracción de materiales reciclables representa en América Latina y el Caribe el 25% de los RSM, e incluye materiales como papel, cartón, plásticos, metales y vidrios (OPS, 2005). En Colombia, dicha fracción alcanza el 24% (MAVDT, 2007), mientras que en las localidades estudiadas oscila entre el 22,2% y el 39,1%, de acuerdo con la información reportada en los diseños de las PMRS.

Para el manejo de esta fracción, se diseñaron centros de acopio para el almacenamiento de los materiales reciclables, con información de la caracterización y muestreo de los RSM y estimación de períodos de almacenamiento; sin embargo, no se consideraron las fluctuaciones del mercado, y ello genera insuficiencia en la capacidad de almacenamiento de los productos. En cuanto a la operación, hay disparidad de criterios para la clasificación de los materiales. Se observa desconocimiento, sobre todo, en el caso del papel y del plástico, que genera dificultades y pérdidas económicas en la comercialización (Marmolejo et al., 2009).

En el caso de procesamiento de materiales in situ que mejoren las características físicas de los materiales y sus precios de comercialización, tan sólo fue considerada la compactación del papel y el plástico. Esta actividad es

altamente ineficiente por los esfuerzos que requieren los equipos manuales o los altos consumos energéticos de los electromecánicos.

d. *Disposición final.* Las PMRS cuentan con el diseño y construcción de rellenos sanitarios de operación manual para la disposición final de los rechazos. Estos rellenos fueron proyectados para la disposición de aproximadamente un 20% de los RSM; sin embargo, la cantidad dispuesta es mayor y ello disminuye la vida útil proyectada, tal como sucede en las PMRS del país, en las que se disponen biorresiduos y reciclables aprovechables, por su alto grado de deterioro (SSPD, 2008), que alcanza en algunas PMRS como la de La Victoria, hasta el 71,4% de los RSM que ingresan (Marmolejo et al., 2009).

Así mismo, la operación y control es incipiente y no incluye compactación del material, aplicación de material de cobertura y manejo de gases y lixiviados. Entre las causas se establecen la poca disponibilidad de equipos y herramientas y el mínimo conocimiento de los trabajadores sobre labores operativas.

La Tabla 2 contiene las variables identificadas para los procesos de la unidad productiva.

Tabla 2. Variables relacionadas con los procesos productivos y la disposición final

Elemento	Núm.	Variable
Recepción	6	Tecnología para la recepción de RSM
	7	Efectividad en el proceso de separación en la PMRS
Compostaje	8	Capacitación de los operarios
	9	Infraestructura para el proceso
	10	Operativas, mantenimiento y monitoreo del proceso
Reciclaje	11	Acondicionamiento de materiales
	12	Almacenamiento de productos
	13	Conocimiento de características y tipo de materiales
Disposición final	14	Disponibilidad de equipos
	15	Capacitación del personal
	16	Operación, mantenimiento y monitoreo

Fuente: presentación propia de los autores.

2.1.3 Productos

Un aspecto fundamental del funcionamiento de las PMRS es la calidad de los productos y su comercialización. La existencia de mercado local para los materiales reciclados ha sido identificada como una importante barrera que incide en el aprovechamiento sostenible de los RSM (Troschinetz y Mihelcic, 2009). La interacción de la calidad del producto, el precio y la demanda del cliente a veces son subestimadas; muchos proyectos fallan debido a la falta de mercado del producto, lo que genera problemas financieros que no pueden ser solventados (Zurbrügg et al., 2005).

En las PMRS no se tiene un registro de la cantidad de los productos generados en los procesos y la calidad de los productos es objetable. Ello disminuye sus posibilidades de venta y precios en el mercado. Los materiales reciclables tienen un mercado potencial que fluctúa; mientras los productos de la transformación de los biorresiduos generalmente no se comercializan y se acumulan en el interior de las PMRS. La Tabla 3 contiene las variables identificadas para los productos y rechazos.

Tabla 3. Variables relacionadas con los productos y rechazos

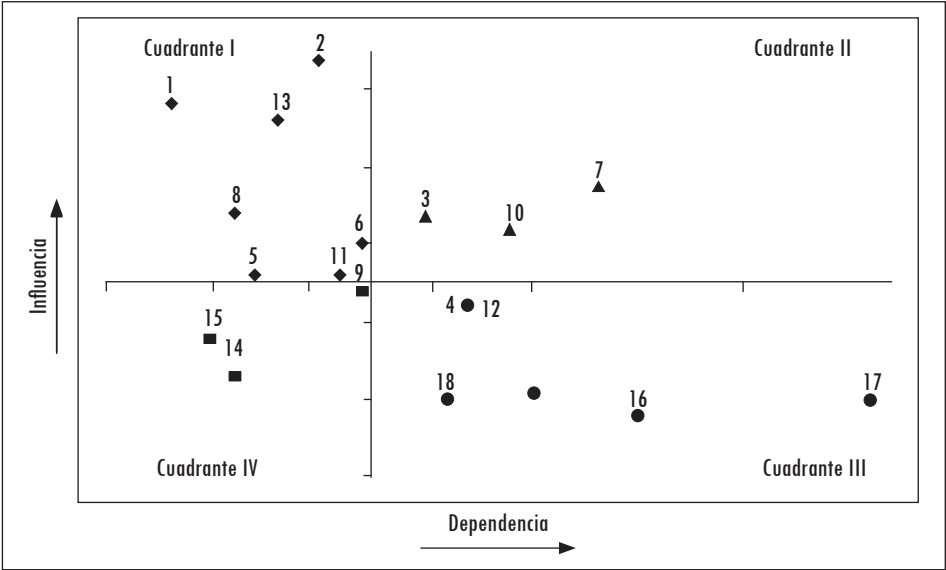
Elemento	Num.	Variable
Calidad y comercialización de productos	17	Estándares de calidad
	18	Mercados disponibles

Fuente: presentación propia de los autores.

2.2 *Análisis de las variables que condicionan el funcionamiento de las PMRS*

La Figura 2 y la Tabla 4 muestran la esquematización de los resultados del análisis MICMAC y la ubicación de las variables.

Figura 2. Resultados del análisis estructural de las variables tecnológicas



Fuente: presentación propia de los autores.

Tabla 4. Ubicación de las variables en cada cuadrante

Cuadrante 1	Cuadrante 2
Cantidad de RSM (1) Aplicación de la separación en la fuente (2) Capacitación del personal para diseño y manejo de la R&T (5) Tecnología para la recepción de RSM (6) Capacitación operarios sobre proceso de compostaje (8) Acondicionamiento de materiales reciclables (11) Conocimiento de características y tipo de materiales reciclables (13)	Equipos acondicionados para la recolección selectiva (3) Efectividad en el proceso de separación en la PMRS (7) Operación, mantenimiento y monitoreo del compostaje (10)
Cuadrante 4	Cuadrante 3
Infraestructura acondicionada para el compostaje (9) Disponibilidad de equipos para la disposición final (14) Capacitación del personal en actividades de disposición final (15)	Diseños de los ruteos (4) Almacenamiento de productos reciclables (12) Operación, mantenimiento y monitoreo de la disposición final (16) Estándares de calidad de los productos (17) Mercados disponibles para comercialización de los productos (18)

Fuente: presentación propia de los autores.

La Figura 2 muestra que la mayor cantidad de variables (diez variables) está ubicada en los cuadrantes I y II. Estas influyen estratégicamente en el funcionamiento de las PMRS, mientras que en los cuadrantes III y IV se ubican ocho variables, que influyen poco en todo el sistema.

Las variables clave para mejorar el funcionamiento de las PMRS son la cantidad de RSM, la aplicación de la separación en la fuente, el conocimiento de las características y tipo de materiales reciclables, las tecnologías para la recepción de los RSM, la capacitación a los operarios para la R&T y el compostaje y el acondicionamiento de materiales reciclables. Es importante notar que las dos primeras variables son externas a las PMRS y permiten precisar el diseño y la operación de los procesos que se realizan en las unidades, incrementar la calidad de los productos y disminuir la de los rechazos; además, son las que mayor influencia tienen en el sistema. Las variables restantes están relacionadas con aspectos internos de la PMRS, como el acondicionamiento de las materias primas y el mejoramiento de la calidad de los productos, aspectos fundamentales para la sostenibilidad económica de las PMRS.

En relación con la cantidad de los RSM, a pesar de realizarse caracterización durante el diseño de las PMRS analizadas, no se reporta información con la cual identificar su representatividad; por lo tanto, es indispensable adecuar metodologías para estimar la generación de RSM, acorde con el contexto de las localidades estudiadas. Adicionalmente, se deben establecer estrategias para mantener actualizada esta información, debido a las variaciones que se presentan en la generación y composición de RSM durante la operación del sistema, tal como se evidencia en la PMRS de La Victoria, que muestra una disminución en la producción per cápita (PPC) y variación en la composición física de los RSM posterior a la puesta en marcha del sistema (Holguín y Quintero, 2001; Amézquita y Bedoya, 2009).

La aplicación de la separación en la fuente tiene una gran incidencia en la calidad de la materia prima y, por consiguiente, en el funcionamiento de los procesos. Su poca aplicación incrementa el deterioro de los productos y la cantidad de rechazos en las PMRS. En los casos analizados, la separación en la fuente es baja (entre el 20% y 50% de los usuarios del servicio) y en PMRS como la de La Victoria se recupera tan sólo el 34,6% de los materiales aprovechables que ingresan a la planta (Marmolejo et al., 2009) por el alto grado de contaminación de los RSM. Por lo tanto, se requiere estimular prácticas de separación en la fuente en los generadores de los RSM.

Otras de las variables con alta influencia (cuadrante II) son equipos acondicionados para la recolección selectiva, efectividad en el proceso de separación en la PMRS y operación, mantenimiento y monitoreo del proceso de compostaje, las cuales dependen de la calidad y características de la materia prima y condicionan el funcionamiento de los procesos, la calidad de los productos y la cantidad de rechazos en la PMRS. Son consideradas causa y efecto del sistema, por lo tanto, un adecuado funcionamiento de los elementos del cuadrante I puede mejorar los elementos del cuadrante II y repercutir en el funcionamiento de todos los elementos del sistema. Para mejorar el desempeño de estas variables en las PMRS analizadas, es necesario adaptar las tecnologías empleadas a las condiciones de la materia prima y a las características del contexto de las localidades, así como capacitar a los trabajadores encargados de la operación, mantenimiento y monitoreo del proceso de compostaje.

En el cuadrante III se ubican variables relacionadas con el funcionamiento normal del sistema como las que incluyen la operación, mantenimiento y control de los procesos de la PMRS, el diseño de los ruteos y el almacenamiento de materiales reciclables. Las variables, estándares de calidad de los productos (17) y mercados disponibles para comercialización de los productos (18) son típicamente variables resultado y están condicionadas por calidad de las materias primas y la efectividad de los procesos. Por ende, es necesario mejorar el funcionamiento de otras variables que conllevará mejorar el desempeño de estas.

En el cuadrante IV se encuentran las variables con baja influencia y dependencia en todo el sistema, no inciden de manera determinante en su evolución y en su mayoría son elementos internos a la PMRS. El mejoramiento de estas variables está relacionado con la adaptación de las tecnologías a las condiciones locales y con procesos de capacitación y entrenamiento a personal involucrado en la planeación y diseño de las PMRS, así como a los encargados de la operación de los elementos. Es preciso remarcar que no es que estas variables carezcan de importancia sino que, comparativamente, los esfuerzos que se destinen ofrecerán mejores frutos en variables situadas en los otros grupos.

2.3 Intervenciones priorizadas para mejorar el funcionamiento de las PMRS

A partir de los resultados del análisis estructural, se proponen las siguientes intervenciones priorizadas:

- a. *Adecuar metodologías para estimar la generación de residuos sólidos.* Dado que en la mayoría de países en desarrollo hay una cantidad limitada de información fiable sobre las características de los residuos sólidos (Mosler et al., 2006) y que

sólo un número limitado de programas de caracterización han sido planeados y ejecutados correctamente (Díaz et al.; 2002), es necesario obtener cifras específicas para cada contexto y adaptar las metodologías tradicionalmente utilizadas para la cuantificación y caracterización de los residuos (Klinger et al., 2009). El empleo de herramientas como el flujo de residuos (Marmolejo et al., 2009) permite identificar los actores y el recorrido de los residuos en el interior del sistema y ello permite establecer estrategias que permitan alcanzar los objetivos de las PMRS.

- b. *Estimular la separación en la fuente.* Es imperativo el impulso de la separación en la fuente para mejorar la calidad de los materiales que llegan a las PMRS analizadas; la continuidad y diversificación de actividades de sensibilización pueden ser efectivas para lograr su arraigo (Marmolejo et al., 2010b). Dado que el estímulo de prácticas como la separación en la fuente y la recolección selectiva pueden incrementar los recuperadores y disminuir aún más las cantidades que ingresan a las PMRS, es conveniente que se establezcan estrategias de acuerdo con los recuperadores y con base en ellas realizar las proyecciones de funcionamiento de las PMRS. Un incentivo para arraigar la separación en la fuente podría ser que el usuario evidenciara el efecto de estas prácticas en la tarifa del servicio de aseo tanto en el corto como en el mediano y largo plazos. Es importante que el usuario identifique su papel respecto de la sostenibilidad de la PMRS; además, que visualice qué beneficios tiene al ser partícipe de dicha sostenibilidad (Marmolejo et al., 2009).
- c. *Adaptar tecnologías.* La disponibilidad y uso eficaz de la tecnología para su operación y mantenimiento (O&M) fue identificada en el 58% de 23 países estudiados como una de las barreras para el aprovechamiento de RSM en países en desarrollo (Troschinetz y Mihelcic, 2009). Entre los problemas más críticos se incluyen el uso inapropiado de tecnologías y tendencias a importar equipos (Díaz et al., 2002). Se requiere que la aplicación de las tecnologías tenga en consideración el contexto de las localidades, como: (a) bajos costos laborales; (b) predominio de los biorresiduos en el flujo de RSM; (c) sector informal activo en la recolección, separación y reciclaje de RSM; (d) pocas personas entrenadas en el manejo de los RSM, y (e) inadecuada infraestructura física (Van de Klundert y Anschütz, 2001). En ese sentido, se precisa investigación local que permita adaptar las tecnologías empleadas a los contextos locales y, además, que suministre herramientas para mejorar las técnicas y metodologías para la operación y monitoreo de los procesos.

- d. *Entrenar a profesionales*. Este aspecto tiene una fuerte incidencia en el proceso, que corrobora lo planteado por Díaz et al. (2007), quienes mencionan que uno de los problemas más críticos para el manejo de los RSM en países en desarrollo es la falta de personal apropiadamente entrenado (nivel técnico y profesional). Se requiere en los cursos profesionales y técnicos abordar temáticas relacionadas con la selección, el diseño, la O&M y el control y monitoreo de tecnologías para el aprovechamiento de residuos sólidos, así como el conocimiento de las características de las materias primas de los procesos.
- e. *Capacitar a operarios*. Se deben desarrollar estrategias de capacitación a los operarios que les permitan mejorar en la identificación de los distintos materiales contenidos en los RSM, técnicas básicas para la operación, control y monitoreo de los procesos y mantenimiento preventivo y correctivo de los equipos empleados en la PMRS. El desarrollo participativo de guías de O&M, así como la transferencia de información a través de seminarios-talleres, dirigidos a los actores locales, puede contribuir a mejorar el conocimiento operativo de los sistemas.

3. Conclusiones

La aplicación del análisis estructural a los sistemas estudiados permitió identificar que las variables de mayor repercusión en el sistema dependen de elementos externos a la PMRS como los relacionadas con la calidad, cantidad y conocimiento de las características de las materias primas, las cuales son determinantes para mejorar el funcionamiento de las PMRS. Con estas variables se precisan elementos del diseño de las PMRS, se optimiza la operación de los distintos procesos realizados en el sistema (recolección y transporte, recepción en la PMRS, aprovechamiento y disposición final), se incrementa la calidad de los productos y disminuye la cantidad de rechazos generados.

Estrategias articuladas y priorizadas como la formulación y adaptación de metodologías para estimar la generación de RSM, el estímulo a los usuarios para la separación en la fuente de los RSM, la capacitación a operarios de las PMRS, el entrenamiento a profesionales que participan en la selección, diseño, operación y monitoreo de las tecnologías, el mejoramiento de los procesos de selección de tecnologías y la adaptación de tecnologías al contexto local son intervenciones que incrementan la efectividad de las PMRS en el contexto colombiano.

La herramienta MICMAC del análisis estructural se constituye en una técnica fundamental para abordar sistemas complejos como los de aprovechamiento de

RSM, pues permite identificar las variables que inciden en el funcionamiento de los componentes del sistema y evaluar su importancia en este. La participación de los actores involucrados en los sistemas facilita la identificación y el análisis de las variables, así como la formulación de estrategias articuladas que contribuyan al mejoramiento de los sistemas.

Referencias

- AMÉZQUITA, C. y BEDOYA, D. *Estimación del flujo de residuos sólidos en la cabecera de La Victoria, Valle del Cauca*. Trabajo de grado, Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle, Cali, 2009.
- APONTE REYES, A. *Modelo conceptual para la toma de decisiones en el sector de abastecimiento de agua, saneamiento básico e higiene*. Tesis presentada como requisito parcial para el título de Máster en Ingeniería, énfasis en Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle, Cali, 2010.
- BARREIRA, L. P.; JUNIOR, A. P. y RODRIGUES, M. S. Usinas de compostagem do estado de São Paulo: qualidade dos compostos e processos de produção. *Engenharia Sanitária e Ambiental*. 2006, vol. 11, núm. 4, pp. 385-393.
- CASTELLANOS, M.; MONTAUBAN, J. y ARISTIDE, R. Prospectiva: importante herramienta para la planificación estratégica. Un ejemplo de aplicación en Economía y Medio Ambiente. En: *Aplicaciones sobre prospectiva y valoración económico ambiental* [libro en línea]. La Habana: Editorial La Habana, 2007. <<http://www.bibliociencias.cu/gsd/collect/libros/index/assoc/HASHed7b.dir/doc.pdf>> [consulta: 06-06-2010].
- DIAZ, L. F.; EGGERTH, L. L.; SAVAGE, G. M. y GOLUEKE, C. G. *The role of composting in the management of solid wastes in economically developing countries. Appropriate Environmental and solid waste management and technologies for Developing Countries*. Istanbul: ISWA, 2002.
- DIAZ L. F.; SAVAGE, G. M. y EGGERTH, L. L. The management of solid waste in economically developing countries – mayor needs. *Eleventh International Waste Management and Landfill Symposium. Proceedings Sardinia*. Sardinia, 2007.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN DE LA REPÚBLICA DE COLOMBIA (DNP). *Lineamientos y estrategias para fortalecer el servicio público de aseo en el marco de la gestión integral de residuos sólidos*. Bogotá: 2008.
- DO PRADO FILHO, J. F. y SOBREIRA, E. G. Desempenho operacional e ambiental de unidades de reciclagem e disposicao de residuos sólidos domésticos financiadas pelo ICMS ecológico de Minas Gerais. *Engenharia Sanitária e Ambiental*. 2007, vol. 12, núm. 1, pp. 52-61.
- DULAC, N. *The organic waste flow in integrated sustainable waste management: Tools for decision-makers. Experiences from the Urban Waste Expertise Programme*. s. l.: WASTE, 2001.
- GALLARDO, A.; BOVEA, M.; COLOMER, F.; PRADES, M. y CARLOS, M. Comparison of different collection systems for sorted household waste in Spain. *Waste Management*. 2010.

- GIDARAKOS, E.; HAVAS, G. y NTZAMILIS, P. Municipal solid waste composition determination supporting the integrated solid waste management system in the island of Crete. *Waste Management*. 2006, vol. 26, núm. 6, pp. 668-679.
- GÓMEZ, G.; MENESES, M.; BALLINAS, L. y CASTELLS, F. Characterization of urban solid waste in Chihuahua, Mexico. *Waste Management*. 2008, vol. 28, núm. 12, pp. 2465-2471.
- HARGREAVES, J.; ADL, M. y WARMAN, P. A review of the use of composted municipal solid waste in agriculture. *Agriculture Ecosystems y Environment*. 2008, vol. 123, núms. 1-3, pp. 1-14.
- HASSEN, A.; BELGUITH, K.; JEDIDI, N.; CHERIF, A.; CHERIF, M.; BOUDABOUS, A. Microbial characterization during composting of municipal solid waste. *Bioresource Technology*. 2001, vol. 80, núm. 3, pp. 217-225.
- HOLGUÍN, J. y QUINTERO, P. *Plan para el manejo integral de los residuos sólidos generados en el municipio de La Victoria, Valle del Cauca*. Trabajo de grado, Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle, Cali, 2001.
- KETLOGETSWE, C. y MOTHUDI, T. H. Botswana's environmental policy on recycling. *Resources Conservation & Recycling*. 2005, vol. 44, núm. 4, pp. 333-342.
- KLINGER, R.; OLAYA, J.; MARMOLEJO, L. F.; MADERA, C. Plan de muestreo para la cuantificación de residuos sólidos residenciales generados en las zonas urbanas de ciudades de tamaño intermedio. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*. 2009, núm. 48, pp. 76-86.
- KOFOWOROLA, O. F. Recovery and recycling practices in municipal solid waste management in Lagos, Nigeria. *Waste Management*. 2007, vol. 27, núm. 7, pp. 1139-1143.
- MARMOLEJO, L. F.; TORRES, P.; OVIEDO, E. R.; BEDOYA, D.; AMEZQUITA, C.; KLINGER, R.; ALBÁN, F. y DÍAZ, L. Flujo de residuos: Elemento base para la sostenibilidad del aprovechamiento de residuos sólidos municipales. *Revista Ingeniería y Competitividad*. 2009, vol. 11, núm. 2, pp. 79-93.
- MARMOLEJO, L. F.; DÍAZ, L. F.; TORRES, P.; GARCÍA, M.; BURBANO, M. H.; BLANCO, C.; ERAZO, K.; PEREIRA, J. F. Influence of handling practices on material recovery from residential solid waste. *Sustainability*. 2010a, vol. 2, núm. 7, pp. 2070-2083.
- MARMOLEJO, L. F.; TORRES, P.; OVIEDO, R.; GARCÍA, M. y DÍAZ, L. F. Key factors for the operation of material recovery facilities for populations with less than 20,000 inhabitants. Artículo en evaluación en *Resources, Conservation and Recycling*. 2010b.
- MBULIGWE, S. E.; KASSENKA, G. R.; KASEVA, M. E.; CHAGGU, E. J. Potential and constraints of composting domestic solid waste in developing countries: findings from a pilot study in Dar es Salaam, Tanzania. *Resources, Conservation and Recycling*. 2002, vol. 36, núm. 1, pp. 45-59.
- MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL REPÚBLICA DE COLOMBIA (MAVDT). Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos Sólidos en Colombia. *VI Congreso Internacional Disposición Final de Residuos Sólidos y Perspectivas Ambientales*. Pereira, 2006.

- MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL (MAVDT). *Evaluación de las cadenas de reciclaje*. Informe MAVDT, Bogotá, Colombia, 2007.
- MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL REPÚBLICA DE COLOMBIA (MAVDT). Instrumentos de planificación y desarrollo del servicio público de aseo, una prospectiva hacia la gestión integral de residuos sólidos. 9° Congreso Internacional Disposición Final del Residuos Sólidos y Perspectivas Ambientales. Armenia, 2009.
- MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE (MINAMBIENTE). *Política para la gestión integral de residuos*. Bogotá, Colombia, 1997.
- MOSLER, H. J.; DRESCHER, S.; ZURBRÜGG, C.; CABALLERO, T. y GUZMÁN, O. Formulating waste management strategies based on waste management practices of households in Santiago de Cuba, Cuba. *Habitat International*. 2006, vol. 30, núm. 4, pp. 849-862.
- NACIONES UNIDAS. *Informe de la cumbre mundial sobre el desarrollo sostenible*. Johannesburgo, 2002.
- ORGANIZACIÓN PANAMERICANA DE LA SALUD (OPS). *Informe regional sobre la evaluación de los servicios de manejo de residuos sólidos municipales en la Región de América Latina y el Caribe*. Washington, 2005.
- OVIDEO OCAÑA, E. R. *Funcionamiento de los sistemas de aprovechamiento de residuos sólidos en localidades menores a 20.000 habitantes del Valle del Cauca*. Tesis presentada como requisito parcial para el título de Máster en Ingeniería, énfasis en Ingeniería Sanitaria y Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad del Valle, Cali, Colombia, 2010.
- RESTREPO TARQUINO, I. *Team learning Project as a strategy to contribute to the sustainability of water supply and sanitation services*. Leeds: University of Leeds, School of Civil Engineering, 2001.
- SUPERINTENDENCIA DE SERVICIOS PÚBLICOS DOMICILIARIOS (SSPD). *Diagnóstico sectorial: plantas de aprovechamiento de residuos sólidos* [documento en línea]. 2008. <http://www.superservicios.gov.co/c/document_library/get_file?uuid=73cfd722-c46e-4caf-b03f-486810f6536c&groupId=10122> [consulta: 02-02-2010].
- SUPERINTENDENCIA DE SERVICIOS PÚBLICOS DOMICILIARIOS (SSPD). *Situación de la disposición final de residuos sólidos en Colombia: diagnóstico 2009* [documento en línea]. 2009. <http://www.superservicios.gov.co/home/c/document_library/get_file?uuid=bcd04c23-976c-4244-9ed5-1685b66824fe&groupId=10122> [consulta: 10-01-2010].
- SHARMA, M. y MCBEAN, E. A methodology for solid waste characterization based on diminishing marginal returns. *Waste Management*. 2007, vol. 27, núm. 3, pp. 337-344.
- TROSCHINETZ, A. M. y MIHELIC, J. R. Sustainable recycling of municipal solid waste in developing countries. *Waste Management*. 2009, vol. 29, núm. 2, pp. 915-923.
- UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME (UNEP) and CALRECOVERY INCORPORATED. *Solid Waste Management*. Vol. 1. s. l.: UNEP, 2005.

- UNIVERSIDAD DEL VALLE (UNIVALLE). *Estrategias para el mejoramiento de opciones tecnológicas de aprovechamiento de residuos sólidos en cabeceras municipales del Valle del Cauca menores a 20.000 habitantes, con visión de sostenibilidad*. Proyecto de Investigación. Cali: Vicerrectoría de Investigaciones, Universidad del Valle, 2010.
- VAN DE KLUNDERT, A. y ANSCHÜTZ, J. *Integrated sustainable waste management - the concept. Tools for Decision-makers. Experiences from the Urban Waste Expertise Programme (1995-2001)*. s. l.: WASTE, 2001.
- ZURBRÜGG, C.; DRESCHER, S.; RYTZ, I.; MAQSOOD SINHA, A. H. Md. y ENAY-ETULLAH, I. Decentralised composting in Bangladesh a win – win situation for all stakeholders. *Resources Conservation & Recycling*. 2005, vol. 43, núm. 3, pp. 281-292.