

Eficiencia en la Gestión de Residuos Sólidos Urbanos: Análisis y evaluación

Cavallin Antonella^{(1)*}, Rossit Diego⁽¹⁾, Frutos Mariano⁽¹⁾, Vigier Hernán⁽²⁾

⁽¹⁾*Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional del Sur. IIESS-CONICET (Instituto de Investigaciones Económicas y Sociales del Sur). Av. Alem 1253, Bahía Blanca, Argentina.*
antonella.cavallin@uns.edu.ar - diego.rossit@uns.edu.ar - mfrutos@uns.edu.ar

⁽²⁾*Departamento de Economía, Universidad Nacional del Sur. CEDETS (CIC-Universidad Provincial del Sudoeste). Alvarado 332, Bahía Blanca, Argentina.*
hvigier@uns.edu.ar

RESUMEN

En el presente trabajo se aborda el tema de gestión de residuos sólidos urbanos (GRSU) desde una perspectiva de análisis y evaluación de su eficiencia. En un contexto de escasez de recursos presupuestarios y técnicos, y de aumento creciente de la producción de residuos, la GRSU es uno de los principales desafíos de política pública tanto para los pequeños municipios como para los grandes, en busca de desarrollar estrategias eficaces y económicamente sustentables. En primer lugar se hace una breve descripción de los sistemas básicos de GRSU (recolección y disposición final) y su tendencia hacia los sistemas de gestión integral de RSU (GIRSU) (disminución de RSU, recolección diferenciada, reciclado, tratamiento y disposición final). En ambos casos se hace una revisión de la literatura identificando los indicadores necesarios de registrar tanto para obtener control de los procesos, como para identificar puntos de mejora y aumentar la eficiencia. En este sentido, la técnica no paramétrica de evaluación de eficiencia DEA (Data Envelopment Analysis) se identifica como una herramienta flexible y eficaz que permite comparar unidades homogéneas y dar soporte a la toma de decisiones, sobre todo en el ámbito público. Se analizan casos de utilización de la misma en municipios extranjeros. En segunda instancia, se presenta un modelo a aplicar en los 22 distritos que conforman la sexta sección electoral de la Provincia de Buenos Aires, enmarcado en un proyecto de recopilación de estadísticas y generación de base de datos de la región, organizado por la Universidad Nacional del Sur y la Universidad Provincial del Sudoeste. Por último, se destaca la importancia de la planificación de las rutas de recolección de RSU, a través de métodos cuantitativos, como estrategia para disminuir costos y aumentar la eficiencia de la gestión.

Palabras Claves: Gestión de Residuos Sólidos Urbanos, DEA, ruteo de vehículos.

ABSTRACT

In this paper, we consider the municipal solid waste management (MSWM) system from an efficiency assessment perspective. The budget and technical resources shortage and the recent waste generation rate rise, have put pressure on City Halls in order to develop efficient and sustainable policies to deal with MSW. We start making a brief description of the basic activities of the MSWM (collection and final disposal) and its present trend toward the Integrated MSWM (reduce of MSW, source separation, recycling, treatment and final disposal). In both cases, we present a literature review identifying the necessary measures for process control and for highlighting the suboptimal weak point. For this purpose the non-parametric technique DEA (Data Envelopment Analysis) represents a flexible and effective analytical tool that allow us to compare homogenous units and to support decision-making processes, especially in governmental issues. Through this tool, firstly, we analyze the experiences in some foreign City Halls; and, secondly, we develop a model to be applied to measure MSWM's efficiency in twenty-two Argentinian municipalities that conform the "Sixth Political District" of the Province of Buenos Aires. This last model is designed in the context of a brand-new data collection project that will be carried out by the Universidad Nacional del Sur and the Universidad Provincial del Sudoeste. Finally, we remark the importance of the use of quantitative methods in the design of routing plans as a way to reduce the MSW's collection costs.

Palabras Claves: Municipal Solid Waste Management, DEA, Vehicle Routing.

1. Introducción

Según indica la Ley 25.916 (2004) de la Nación Argentina, se denomina residuo domiciliario a aquellos elementos, objetos o sustancias que como consecuencia de los procesos de consumo y desarrollo de actividades humanas, son desechados y/o abandonados. Por su parte, la Ley 13.592 de la Provincia de Buenos Aires, define a los residuos sólidos urbanos (RSU) como aquellos elementos, objetos o sustancias generados y desechados, producto de actividades realizadas en los núcleos urbanos y rurales, comprendiendo aquellos cuyo origen sea doméstico, comercial, institucional, asistencial e industrial no especial asimilable a los residuos domiciliarios. Asimismo, se describe como gestión integral de residuos sólidos urbanos (GIRSU) al conjunto de actividades interdependientes y complementarias entre sí, que conforman un proceso de acciones para el manejo de residuos domiciliarios, con el objeto de proteger el ambiente y la calidad de vida de la población. La GIRSU comprende las etapas de generación, disposición inicial, recolección, transferencia, transporte, tratamiento y disposición final. De la misma forma, busca promover la valorización de los residuos domiciliarios (entendiéndose como tal, el aprovechamiento de los recursos contenidos en los residuos, sin poner en peligro la salud humana y sin utilizar métodos que puedan perjudicar al medio ambiente), a través de la implementación de métodos y procesos adecuados, disminuyendo los residuos con destino a disposición final y minimizando los impactos negativos que estos residuos puedan producir sobre el ambiente.

En los últimos años, el incremento del consumo de productos desechables, descartables o de rápida obsolescencia, junto con el desarrollo urbanístico y el aumento de la densidad de población en muchas ciudades, han dado lugar a un aumento en el volumen de los RSU generados, así como a una distinta composición de los mismos. Según la séptima edición del informe "Sistemas de indicadores de desarrollo sostenible" de Argentina, en el 2012 se ha llegado a generar en promedio 1 kilogramo de RSU por habitante por día.

Desde la promulgación de la Ley 25.916, en Argentina se dio comienzo a distintas iniciativas provinciales y municipales para cumplir con los objetivos propuestos. Cada ciudad comenzó por realizar las mejoras necesarias según el estado en el que se encontraba su respectivo sistema de GIRSU (erradicación de basurales a cielo abierto, construcción de rellenos sanitarios, disposición de contenedores para recolectar materiales reciclables, desarrollo de sistemas de recolección diferenciada de RSU, instalación de plantas de acopio y/o tratamiento de RSU, entre otras). De esta forma, los cambios y avances en algunos municipios fueron notables, mientras que en otros se mantiene la falta de un tratamiento integral de los RSU. Datos del informe "Mapas críticos de gestión de residuos" (2016) revelan que el porcentaje de cobertura de recolección de RSU por provincia ha mejorado en los últimos años, superando el 80% promedio, mientras que el porcentaje de disposición adecuada en rellenos sanitarios, a nivel país, alcanza el 61% de habitantes, identificando a provincias como Neuquén, San Juan, Tucumán, Misiones y Gran Buenos Aires con porcentajes superiores al 80%, mientras que en otros casos se registran números inferiores al 20%. En la provincia de Buenos Aires, foco central del presente trabajo, alrededor de un 85% de los municipios poseen una disposición final adecuada de RSU. En cuanto a iniciativas de tratamiento de RSU, el mismo informe realiza un relevamiento de las plantas de separación municipales por provincia, indicando en el país un promedio de 37% de alcance de la población y en la Provincia de Buenos Aires un 76%.

Por otro lado, a la par del desarrollo de iniciativas sustentables, todo sistema de GIRSU debe llevar a cabo un plan de evaluación y medición de su situación y progreso, con el objetivo de tener conocimiento de su real desempeño, sus puntos débiles y fuertes y, además, necesario como base para la toma de decisiones de corto, mediano y largo plazo. En este sentido, en los últimos años, se han desarrollado numerosos indicadores de sostenibilidad ambiental o sustentabilidad que reúnen un conjunto de parámetros para obtener información específica de algún proceso o función que actúe en la relación sociedad-ambiente (Puma-Chávez et al., 2011) [20]. El objetivo de dichos indicadores es proveer una base empírica y numérica para conocer las problemáticas ambientales, calcular el impacto de las actividades de los seres humanos en su entorno y evaluar el desempeño de las políticas públicas, ayudando a los tomadores de decisiones y a la sociedad a definir metas en pos del desarrollo sustentable (Rodríguez Solórzano, 2002) [21]. Específicamente, en el área de la GIRSU, los indicadores surgen con el propósito de obtener un seguimiento y control del funcionamiento del sistema en pos de mejorar la calidad del servicio que proporcionan los organismos, públicos o privados, que lo gestionan.

El presente trabajo se desarrolla de la siguiente manera. En la sección 2 se realiza una breve presentación de la técnica DEA (Data Envelopment Analysis) y se mencionan algunos casos donde se aplicó en la GIRSU. Posteriormente, en la sección 3, se señalan los indicadores para la GIRSU más nombrados en la literatura y se presentan modelos de evaluación de eficiencia relativa los cuales se aplicarán en los 22 distritos que conforman la sexta sección electoral de la Provincia de Buenos Aires, enmarcado en el proyecto “Observatorio de estadísticas regionales”, organizado por la Universidad Nacional del Sur y la Universidad Provincial del Sudoeste. En la sección 4 se destaca la importancia de la planificación de las rutas de recolección de RSU, a través de métodos cuantitativos, como estrategia para disminuir costos y aumentar la eficiencia de la gestión. Por último, las secciones 5 y 6 corresponden a las conclusiones y bibliografía utilizada, respectivamente.

2. Técnica DEA

En lo que refiere al desarrollo de indicadores de eficiencia, la técnica DEA se ha utilizado en numerosos trabajos y experiencias concretas de GIRSU. DEA es un método de apoyo a la toma de decisiones que permite medir eficiencia en términos relativos comparando unidades homogéneas de toma de decisión denominadas DMU (Decision Making Units) que utilizan entradas o inputs para producir salidas u outputs. De esta forma, las DMU más eficientes serán aquellas que maximicen la relación output/input (Dyson, 2001) [13]. Cabe destacar que dicha relación puede maximizarse si aumentan los outputs o disminuyen los inputs. En cada caso, el modelo DEA se denomina orientado al output u orientado al input, respectivamente. Entonces, es posible definir tres medidas de eficiencia:

Eficiencia técnica: refleja la habilidad de la DMU de obtener el máximo nivel de producción dados ciertos niveles en el uso de los recursos o factores.

Eficiencia de asignación: refleja la habilidad de la DMU de usar los recursos o factores en proporciones óptimas (dados sus precios).

Eficiencia de escala: se manifiestan según la naturaleza de los rendimientos a escala con que opera la DMU.

Cabe aclarar que el presente trabajo se desarrollará sobre el análisis de eficiencia técnica. La resolución de la técnica DEA se basa en un modelo de programación lineal no paramétrica que arroja como resultado un valor, normalmente llamado θ , el cual si es igual a 1 significa que la DMU₀ evaluada es eficiente en relación con las otras DMU, puesto que no es posible encontrar ninguna DMU o combinación lineal de DMU que obtenga al menos el output de la DMU₀ utilizando menos factores (hablando de un modelo orientado al input). En caso contrario, si $\theta < 1$ la DMU₀ será ineficiente. Análogamente, orientando el modelo al output, será eficiente para $\theta = 1$ e ineficiente para $\theta > 1$. Considerando la figura 1(a), se identifican cuatro DMU (A, B, C y D) cada una de las cuales obtiene un único output (y) empleando para ello dos inputs (x_1 , x_2). En la misma, se muestra el “plan de producción” (x_1/y , x_2/y) para cada una de las referidas DMU. La isocuanta unidad de las DMU eficientes viene representada por la curva I', de tal modo que aquellas que se encuentran por encima de la misma resultan ineficientes. Así, la eficiencia técnica que pone de manifiesto la capacidad que tiene una DMU para obtener el máximo output a partir de un conjunto dado de inputs, se obtiene al comparar el valor observado de cada DMU con el valor óptimo que viene definido por la frontera de producción estimada (isocuanta eficiente). Observando la misma figura puede verse que tanto la unidad B como la D son ineficientes técnicamente, puesto que ambas podrían reducir la cantidad de inputs consumidos y seguir produciendo una unidad de output. La ineficiencia de estas DMU vendrá dada por la distancia B'B y D'D, respectivamente. Por el contrario, las unidades A y C son técnicamente eficientes puesto que operan sobre la isocuanta eficiente. Cuando una DMU obtiene el valor $\theta = 1$ se dice que posee una eficiencia de Farrell. Sin embargo, puede ocurrir que en la resolución aparezcan variables residuales o de holgura que indiquen que hay presencia de inputs u outputs que podrían reducirse o incrementarse, respectivamente. En dicho caso, se denomina eficiencia de Pareto-Koopmans cuando la DMU presenta $\theta = 1$ y holguras iguales a cero, e ineficiencia cuando $\theta < 1$ y holguras distintas de cero. En la figura 1(b), donde se consideran dos inputs (x_1 , x_2) y un output (y), se pretende reflejar la situación descrita anteriormente. Las DMU etiquetadas como A, B, C y D son eficientes técnicamente según la condición de eficiencia de Farrell, puesto que su puntuación de eficiencia es igual a uno. La DMU E es ineficiente ($\theta < 1$). Por otro lado, sólo las DMU B y C son eficientes técnicamente según la condición de Pareto-Koopmans, ya que tanto la DMU A como la DMU D presentan holguras. La primera en el input x_2 y la segunda en el input x_1 ,

que indicarán en cuánto las unidades A y D deberían reducir el consumo de dichos inputs. Ninguna DMU presenta holgura en el output.

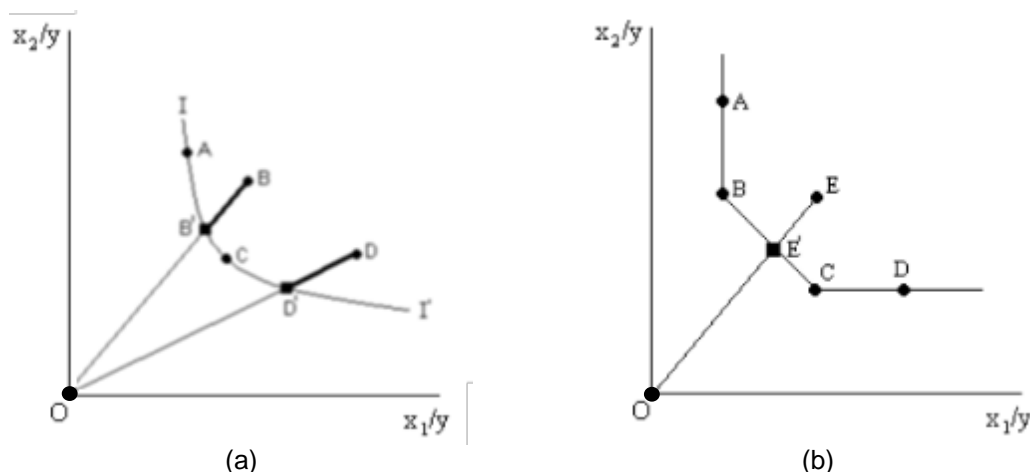


Figura 1. Data Envelopment Analysis

Mediante la utilización de DEA se procura el diseño de un instrumento de evaluación a través de un conjunto de indicadores integrados en un modelo, para medir la eficiencia con la que operan los programas de gestión de RSU implementados. Ali et al. [1] (2015) integran DEA a la gestión de residuos peligrosos en EEUU. Baba et al. (2015) [3] y Villavicencio y Didonet (2009) evalúan la eficiencia en municipios del estado Graha Padma y Catalunya, respectivamente. En este último se utilizan tres modelos orientados al output con rendimientos constantes para evaluar 48 municipios. En el primero se consideran 2 inputs (cantidad de RSU recolectados y cantidad de habitantes por municipio) y 4 output deseables (cantidad de RSU orgánicos, vidrio, papel y envases). El segundo sólo considera la cantidad de habitantes como input mientras que determina la cantidad de RSU dispuesto en el relleno sanitario como output indeseado. El tercer modelo integra los inputs y outputs de los modelos anteriores, invirtiendo el valor del output indeseado (elevado a la potencia -1). De dicho análisis resultan sólo dos municipios (Reus y Vic) como eficientes en los 3 casos.

3. Definición de indicadores para la GIRSU y su implementación en DEA

A continuación se hará una mención acerca de los indicadores para la GIRSU, se describirán las consideraciones metodológicas, se definirán los modelos utilizados con DEA y finalmente se mostrarán algunos resultados.

3.1. Indicadores para la GIRSU

En un contexto de escasez de recursos presupuestarios y técnicos y de aumento creciente de la producción de residuos, la GIRSU es uno de los principales desafíos de política pública tanto para los pequeños municipios como para los grandes, en busca de desarrollar estrategias eficaces y económicamente sustentables (Schejtman & Cellucci, 2014) [23]. Como se mencionó anteriormente, para poder avalar y sostener dichas estrategias es necesario la definición y medición de indicadores. Si bien dicha acción implica gastos monetarios, de tiempo y de personal es clave considerarlos como una inversión en vez de un gasto. No sólo el aumento de la generación de RSU es insostenible por los recursos presupuestarios limitados, si no también, porque lo son las disponibilidades y capacidades físico-químicas del territorio destinado a basurales o rellenos sanitarios. Los resultados de los indicadores sirven para identificar falencias en el sistema y su consecuente solución para mejorar la eficiencia del mismo. Asimismo, son esenciales para tomar conciencia del impacto que generan sobre la salud y el ambiente las prácticas y manejos inadecuados de los RSU, buscando sensibilizar a la población y advirtiendo a los gobernantes sobre las ventajas de la reducción y recuperación de los residuos (Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 2005) [2]. De esta forma, se podrá dar comienzo a un cambio de paradigma que conduzca al desarrollo sustentable de la ciudad. Por otro lado, la consideración de indicadores para la GIRSU es importante para comparar el desempeño de diferentes municipios, identificando aquellas gestiones de vanguardia y modelos a seguir según las características y condiciones de cada uno. A su vez, permiten anticipar situaciones de peligro como contaminación de napas, ríos y para demostrar relaciones de dependencia entre variables.

Un indicador en la GIRSU surge de combinar parámetros simples, como por ejemplo frecuencia de recolección, número de vehículos de flota recolectora o número de viajes a disposición final, de forma que el resultado de la combinación contribuya a analizar aspectos de la gestión tales como calidad del servicio prestado, eficiencias relativas, necesidad de material rodante, etc. (Gobierno de Chile, Comisión Nacional de Medio Ambiente, 2001) [14].

3.2. Consideraciones metodológicas

Se revisaron alrededor de 50 publicaciones (nacionales e internacionales) relacionadas a la GIRSU y al desarrollo de indicadores ambientales. Se identificaron los indicadores y parámetros para la GIRSU que se mencionaban en cada caso y se los clasificó en función del grado de avance de gestión necesaria para que un municipio pueda medirlo. De esta forma se consideraron indicadores básicos, intermedios y avanzados. Los mismos se describen en la tabla 1.

Tabla 1. Clasificación de indicadores por grado de avance de la gestión

Clasificación de indicadores por grado de avance de la gestión	
Básicos	Cualquier municipio con un sistema de recolección de RSU podría medirlo
Intermedios	Municipios con algún tipo de recuperación frecuente de materiales reciclables
Avanzados	Municipios con recuperación, tratamiento y venta de materiales reciclables

El criterio de clasificación utilizado se determinó luego de relevar la información tan variada encontrada. Es decir, la diversidad es tal que, en algunos de los artículos más antiguos analizados como Bahía (1996) [4] y Ministerio de Medio Ambiente de Nueva Zelanda (2000) [19], se presentan indicadores que tienen en cuenta, por ejemplo, los ingresos obtenidos a partir de la gestión de los RSU. Mientras que en publicaciones más recientes como el informe de la Secretaria de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación Argentina (2014) [24] sólo se evalúa la disposición final de los RSU, la composición y la generación por habitantes, entre otros indicadores elementales.

Asimismo, se consideró importante la distinción en función de la realidad y situación actual tan diferente de cada municipio, sobre todo en el país. Por un lado se encuentran ciudades que aún utilizan basurales a cielo abierto como método de disposición final mientras que otras localidades ya integran al sistema de GIRSU plantas de reciclado y obtención de materias primas. En este sentido, hablar de indicadores que evalúen, por ejemplo, el nivel de aceptación de la sociedad de separar la basura en sus hogares no tiene sentido para un municipio que no aplica un programa de recolección diferenciada de RSU. La forma de clasificar los indicadores puede ayudar a los municipios, en primer lugar, a ubicarse en que grado de avance se encuentran respecto a la gestión de RSU, y luego a orientarse en las estrategias a desarrollar en pos de avanzar hacia el desarrollo sustentable en la GIRSU. Cabe destacar que la ausencia de la medición de un indicador no sólo señala que no hay control o seguimiento de determinado sistema sino también ausencia de dicho sistema, la cual es una situación aun peor.

Una vez realizada la clasificación mencionada, se utilizaron algunos criterios de Puma-Chávez et al. (2011) para re-clasificar los indicadores en cada una de las categorías según el área específica de aplicación. Estos son: generación, recolección, disposición final, opinión social y concientización, y eficiencia.

Como resultado de la revisión de la literatura se obtuvieron 73 indicadores de GIRSU. Luego de la clasificación, las categorías quedaron compuestas por la cantidad de indicadores que indica la tabla 2. Cabe destacar y es interesante observar donde se concentran las mayores cantidades en cada una de las categorías de grado de avance. En los indicadores para municipios de gestión básica se centra la atención en la disposición final. Estos tienen que ver con el tipo de disposición final (relleno sanitario, basural a cielo abierto o incineración), la velocidad de llenado y vida útil del relleno sanitario, el tratamiento de los gases y lixiviados producidos en el mismo, el manejo de RSU por parte de recolectores informales, entre otros. Tiene sentido que los municipios que solo tienen implementados una gestión de RSU básica hagan hincapié en la disposición final ya que significa una primera e importante aproximación a una gestión sustentable e integral de RSU. El foco está puesto en generar un área apta para la disposición final de residuos, controlando los lixiviados y los gases que se generan. Es discutible si ese foco está bien orientado. Es decir, ¿Por qué no hacer

más énfasis en la concientización social sobre la disminución de la generación de residuos, la disminución del consumo y reutilización de productos hasta el final de su vida útil? O en mejorar la eficiencia con la que opera el sistema como en aumentar el porcentaje de viviendas alcanzadas por el sistema de GRSU o disminuir los costos implicados en el mismo. La respuesta parece estar en un tema de plazos de tiempo frente a la urgente necesidad de acción. La experiencia ha demostrado que invertir en infraestructura otorga respuestas más rápidas que invertir en campañas de concientización de la población.

Tabla 2. Conteo de indicadores recolectados según clasificación

Clasificación	Indicadores			Total
	Básicos	Intermedios	Avanzados	
Generación	3	13	5	21
Recolección	3	3	3	9
Disposición Final	17	2	2	21
Opinión Social y Concientización	3	5	1	9
Eficiencia	8	1	4	13
Total	34	24	15	73

En los indicadores intermedios, la mayoría se encuentra en la generación. Esto es porcentaje de materiales reciclables recuperados (cartón, papel, vidrio, plástico, metal) y residuos orgánicos para la realización de compostaje. También incluye la recuperación de aceite usado, y promoción de estrategias empresariales para la diferenciación y tratamiento de sus residuos.

Los indicadores avanzados presentan mayoría en la generación y la eficiencia. En el primer caso, hay que tener en cuenta que se refiere a generación de nuevos productos o materias primas a partir de residuos recuperados y a la generación de energía. Respecto a la eficiencia, tiene que ver con la búsqueda de la autonomía económica del sistema, buscando aumentar los ingresos por ventas de residuos reciclables o ahorros obtenidos por generación de energía.

3.3. Desarrollo de un indicador con DEA

Utilizando algunos de los indicadores y parámetros dispuestos en la clasificación básicos-eficiencia, se creará un nuevo indicador con el objetivo de evaluar la eficiencia en municipios de gestión básica. Se utilizaron 4 modelos DEA (M1, M2, M3 y M4), detallados en la Tabla 3, variando los input y los output según diferentes criterios. Los indicadores y parámetros utilizados en los mismos se nombran a continuación.

Capacidad vehicular de recolección de RSU (C): Obtenido a partir de la suma de las capacidades de los camiones recolectores de RSU utilizados en el mes.

Mano de Obra Directa (MOD): se refiere al tiempo de trabajo de los recolectores de RSU, expresado como la sumatoria de las horas trabajadas por los mismos en un mes.

Frecuencia (F): Frecuencia de recolección de RSU, expresada en cantidad de veces que se recolecta RSU en un mismo sitio en una semana. Da una idea de la concientización y compromiso de la sociedad con el servicio. Tiene que ver con si el ciudadano saca los residuos de su vivienda a un horario y día predefinido, de forma que se maximiza la organización de la recolección a través de la minimización de la frecuencia.

Población (P): Número de habitantes del municipio. Dicho dato se utiliza para dar al indicador una idea del tamaño del municipio evaluado.

Cantidad RSU Recolectados (R): toneladas de RSU recolectadas por mes.

Población alcanzada por la recolección (A): Porcentaje de la población que es alcanzada por el servicio de recolección domiciliar de RSU. Variación entre 0-100%.

Tendencia (T): es un indicador que intenta dar una idea acerca de la proactividad e iniciativas llevadas a cabo por el municipio en pos de la gestión sustentable e integral de los RSU. El mismo está compuesto por los siguientes ítems: disposición final en relleno sanitario, planta de acopio de RSU reciclables, recolección diferenciada sectorial, puntos limpios e inclusión de recolectores informales de RSU reciclables. Cada uno aporta 1 punto en caso de su existente implementación, obteniéndose 5 puntos como máximo resultado. En casos parciales, se coloca un puntaje parcial. Por ejemplo, si posee planta de acopio de RSU reciclables pero aún no se utiliza se califica con 0,5 puntos.

Tabla 3. Modelos a aplicar con DEA

Modelo	Entradas	Salidas	Orientación	DMU necesarios
M1	– Capacidad vehicular (C) – Mano de Obra Directa – Frecuencia – Población	– RSU Recolectados (R)	Output	8
M2	– Capacidad vehicular (C) – Mano de Obra Directa – Población	– RSU Recolectados (R) – Frecuencia (-1)	Output	12
M3	– Capacidad vehicular (C) – Mano de Obra Directa – Frecuencia	– RSU Recolectados (R)	Input	6
M4	– Capacidad vehicular (C) – Mano de Obra Directa – Frecuencia – Población – Población Alcanzada ⁽⁻¹⁾ (A) – Tendencia ⁽⁻¹⁾ (T)	– RSU Recolectados (R)	Output	12

La diferenciación de los 4 modelos estudiados corresponde a diferentes criterios en el análisis. En M1 se busca mejorar la eficiencia aumentando las salidas, es decir, aumentando la cantidad de RSU recolectados, considerando las entradas como fijas. Esto tiene que ver con establecer una política que no pretenda la disminución de MOD (que significa despedir personal o reacomodarlo), ni tampoco la reducción de la capacidad vehicular de recolección; considerando que la cantidad de la población es un parámetro determinado. Dado que la frecuencia sí es un indicador de entrada más factible de modificar, en M2 se la considera como una salida afectada por la potencia (-1) (utilizando la estrategia mencionada por Villavicencio y Didonet (2009)) [26]. Por el contrario, en M3 se consideran las entradas como variables al orientarlo al input, buscando aumentar la eficiencia disminuyendo las entradas. Cabe destacar que no se considera el parámetro de cantidad de población debido a que no es un valor que podría disminuirse. Por último, en M4 se tienen en cuenta el alcance del servicio de recolección de RSU (A) y el factor de tendencia (T). Ambos fueron utilizados como entradas de forma que, al orientarse el modelo al output, sean considerados en el análisis pero sin influir en el vector de eficiencia. Es decir, no se los considera como salida porque son parámetros acotados donde los valores que deberían tomar para ser eficientes son conocidos (100% y 5 puntos, respectivamente). Según Dyson (2001) la cantidad de DMU a considerar debe ser mayor o igual al doble del producto de la cantidad de entradas por la cantidad de salidas. De esta forma se calcularon los DMU necesarios para cada modelo. A modo de ejemplo, se muestra a continuación la cantidad de DMU mínima necesaria para M2.

Cantidad de DMU $\geq 2 * \text{cantidad de Entradas} * \text{cantidad de Salidas}$

Cantidad de DMU $\geq 2 * 3 * 2$

Cantidad de DMU ≥ 12

Finalmente se utilizaron 22 DMU, en relación a los 22 distritos que conforman la sexta sección electoral de la Provincia de Buenos Aires y donde se pretende aplicar el modelo desarrollado en el presente trabajo.

3.4. Resultados

Se utilizaron valores ficticios para poder probar el modelo y realizar los análisis correspondientes. En la tabla 4 se muestran los resultados obtenidos de 3 DMU simbólicas, de manera de mostrar representativamente las variadas soluciones y sus potenciales análisis. La DMU A no resultó eficiente en ninguno de los modelos analizados, de esta forma, se indica en cada caso en cuanto debería aumentar el porcentaje de output y cuanto disminuir los inputs en M3 para alcanzar eficiencia técnica. Según M1, la DMU A debería aumentar en un 39% los RSU recolectados, mientras que en M4, dicho valor corresponde a un 10% y en M2 101% acompañado de la disminución de la frecuencia de recolección en un 58% ($1/1.74*100$). Para el análisis de M3, la gestión de A debería disminuir todos sus recursos en un 28%. En el caso de la DMU B sólo resultó ineficiente en el modelo M3, obteniendo eficiencias de Farrell en los demás. Un municipio con estas características indicaría que la cantidad de RSU recolectados es acorde a los recursos de los que dispone pero sin embargo podría disminuir su capacidad vehicular, su MOD y la frecuencia de recolección para recolectar la misma cantidad de RSU. La DMU C alcanzó la eficiencia de Pareto-Koopmas en todos los modelos.

Tabla 4. Resultados representativos de los Modelos aplicados con DEA

	M1 (↑%)	M2 (↑%)		M3 (↓%)			M4 (↑%)	Tipo de Eficiencia
	R	R	F ⁻¹	C	MOD	F	R	
DMU A	39	101	174	28	28	28	10	Ineficiente en todos los modelos
DMU B	0	0	0	37	23	23	0	Eficiencia de Farrell en M1, M2 y M4. Ineficiencia en M3
DMU C	0	0	0	0	0	0	0	Eficiencia de Pareto-Koopmas en todos los modelos

4. Planificación de rutas de recolección de RSU

Con miras a la mejora de la eficiencia de la GRSU, la planificación de rutas de recolección se presenta como una potencial estrategia de baja inversión monetaria pero que requiere un gran trabajo de investigación y desarrollo. En Argentina, el diseño de rutas de recolección de RSU se basa mayormente en conocimientos empíricos de los tomadores de decisiones. Sin menospreciar el invaluable aporte que puede realizarse desde la práctica y la experiencia, la bibliografía es amplia en el aporte tanto en términos de reducción de costos como de impacto ambiental, que pueden brindar la utilización de técnicas de apoyo a la toma de decisiones. Se han hecho varios aportes en distintas ciudades argentinas. Por ejemplo, en la ciudad de Río Cuarto se han diseñado varios algoritmos para diseñar las rutas de recolección de residuos infecciosos, incluyendo combinaciones de técnicas exactas y heurísticas (Simón et al., 2012) [25] y algoritmos puramente heurísticos tanto genéticos (Méndez et al., 2004) como meméticos (Méndez et al., 2009) (Méndez et al., 2010) [16, 17, 18]. Naturalmente otra ciudad que ha recibido especial atención en este campo es la Ciudad de Buenos Aires. Bonomo et al. (2009) y Larumbe (2009) [8, 15] implementan modelos de programación lineal para optimizar las rutas de recolección de contenedores de residuos en la zona sur de la Ciudad de Buenos Aires. Bonomo et al. (2012) [9] también trabajan optimizando las rutas en esta zona teniendo como objetivos no sólo minimizar las distancias de recorrido sino también minimizar el desgaste de los vehículos. En Concordia, Bertero (2015) [5] presenta una aplicación para diseñar las rutas de recolección de la ciudad haciendo un esfuerzo por minimizar la cantidad de giros para volver las rutas más aceptables por los tomadores de decisiones. Bianchetti (2015) [5] presenta un algoritmo para resolver la zonificación de la ciudad de San Miguel de Tucumán a los efectos de optimizar el uso de recursos, reasignando camiones hacia la zona céntrica de la ciudad. Braier (2015) [10] elabora un modelo de programación entera para la recolección de residuos reciclables en la ciudad de Morón.

La cantidad de trabajos que aplican técnicas de optimización en la recolección de residuos en la región del sudoeste de la Provincia de Buenos Aires es escasa. Algunas excepciones son los trabajos presentados por Rossit et al. (2015), que elaboran un ensayo que simula la instalación de contenedores de residuos plásticos en un sector urbano de la ciudad de

Bahía Blanca y su recolección, y Cavallin et al. (2015^a) (2015^b), [11, 12] que presentan modelos VRP con balanceo de distancias entre las distintas rutas para diseñar los recorridos de los recolectores informales de residuos reciclables en el área de Bahía Blanca. Es interés de los autores destacar la importancia que tendría la inversión en recursos humanos y tecnologías que permitan extender la aplicación de la programación matemática en el diseño de rutas para la recolección de RSU como mecanismo para reducir el costo de los sistemas GIRSU. Una necesidad importante para la aplicación de métodos de optimización en la logística de transporte lo constituye el desarrollo de mapas adecuados. Entre los datos de entrada de un modelo VRP, o cualquiera de sus variantes, se encuentran las distancias o, en su defecto, un costo proporcional a las mismas. El cálculo de distancias urbanas es más complejo que la simple distancia Eucladiana entre dos puntos.

En Argentina, ayudados por el concepto de “cuadra” que se desarrolló en la planificación colonial de las ciudades y realizando una simplificación extrema, podríamos suponer que una región urbana sigue una cuadrícula perfecta y utilizar distancias de Manhattan (Black, 2006) [7], esto es, que la distancia entre dos puntos es la suma de las distancias absolutas de sus coordenadas cartesianas, para calcular la lejanía entre localizaciones citadinas. Sin embargo, muchas veces esta simplificación se aleja enormemente de la realidad debido principalmente a dos factores: la disposición de las calles en algunas ciudades es muy distinta a una cuadrícula perfecta y, al estar considerando la circulación de vehículos, los mismos deben respetar reglas de tránsito fundamentales como la dirección de las calles y la imposibilidad de realizar giros en “U”. Lamentablemente, al día de hoy, la mayoría de las ciudades argentinas no cuentan con mapas digitales propios adecuados que incluyan entre sus características información sobre los sentidos de las calles y la presencia de semáforos, lo cual es importante para conocer si ciertos giros se encuentran habilitados (Larumbe, 2009). Una excepción la constituye la Ciudad de Buenos Aires, donde el gobierno local posee una unidad de sistemas de información geográfica (USIG), dependiente del Ministerio de Modernización de la ciudad, que es la encargada del mantenimiento de los mapas urbanos digitales. En la ciudad de Bahía Blanca existe sólo una representación de la ciudad en formato AutoCAD que data ya de algunos años. Al no poseer las orientaciones de las calles su utilidad para los fines del ruteo de vehículos es limitada. Debe recordarse que plataformas como Google Maps o Microsoft Bing Maps son gratuitos sólo para uso individual. Cuando se realizan una gran cantidad de consultas en poco tiempo el programa exige el uso de una licencia. El desarrollo de plataformas libres como OpenStreetMap (OSM¹), que permite descargar información geográfica urbana, o Open Source Routing Machine (OSRM²), que no sólo permite descargar los mapas sino la ruta más corta entre diversos puntos, son proyectos esperanzadores que han sido utilizados con éxito en Argentina (Bertero, 2015) (Bianchetti, 2015). Basados en ellos, se abarata el acceso a mapas digitales por parte de los planificadores de localidades del interior argentino que no cuentan con gran presupuesto. Sin embargo, su utilización no es inmediata y ocasiona problemas de compatibilidad.

5. Conclusiones

Los indicadores de GIRSU surgen con el propósito de obtener un seguimiento y control del funcionamiento del sistema en pos de mejorar la calidad del servicio que proporcionan los organismos, públicos o privados, que lo gestionan. Como resultado de la revisión de la literatura se obtuvieron 73 indicadores de GIRSU, los cuales fueron clasificados según su tipo de gestión (básica, intermedia, avanzada) y según el área específica de aplicación (generación, recolección, disposición final, opinión social y Concientización, etc.). Cabe destacar que la primera clasificación mencionada fue definida por los autores del presente trabajo en función del análisis y las conclusiones obtenidas luego de la revisión de la literatura. Posteriormente, se mostraron 4 modelos de evaluación de eficiencia con DEA en municipios con gestión básica, es decir que sólo implementan un sistema de recolección de RSU, sin considerar recuperación de materiales reciclables. La diferenciación de los modelos estuvo dada por las consideraciones en los inputs y outputs, así como en la orientación a uno u a otro. En este sentido, los resultados obtenidos muestran la practicidad de la herramienta DEA en la evaluación de la eficiencia relativa en el área de la

¹ <http://www.openstreetmap.org/>

² <http://map.project-osrm.org/>

GIRSU, y su potencial para orientar las decisiones en la gestión en pos del desarrollo sustentable. Por otro lado, la planificación de rutas de recolección de RSU es una estrategia para mejorar la eficiencia de la gestión municipal que optimiza los recursos disponibles para obtener mejores resultados, pero que sin embargo, aún no es una herramienta muy utilizada por los municipios de nuestro país. Como futuros trabajos, se pretende el análisis de la mejora de la eficiencia a través de la utilización de métodos de computación evolutiva como redes neuronales, de forma de poder proyectar soluciones eficientes ante las situaciones actuales.

6. Bibliografía

- [1] Ali, M., Yadav, A., Anis, M. & Sharma, P. (2015). Multiple criteria decision analysis using DEA-TOPSIS method for hazardous waste management: a case study of the USA. *International Journal of Managing Information Technology (IJMIT)*, Vol.7, No.3. 1-17.
- [2] Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (AIDIS), Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo (IDRC). (2005). *Directrices para la gestión integrada y sostenible de residuos sólidos urbanos en América Latina y el Caribe*. Sao Paulo.
- [3] Baba, S. J. (2015). Evaluation of Municipal Solid Waste Management System (Case Study: Graha Padma Estate, Semarang). *Science Journal of Environmental Engineering Research*.
- [4] Bahia, S. R. (1996). Sustainability indicators for a waste management approach. *Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*, 25 (pp. 1-11).
- [5] Bertero, F. (2015). Optimización de recorridos en ciudades. Una aplicación al sistema de recolección de residuos sólidos urbanos en el Municipio de Concordia (Tesis de grado). Departamento de Ciencias de la Computación, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario, Rosario, Argentina.
- [6] Bianchetti, M. (2015) Algoritmos de zonificación para recolección de residuos (Tesis de grado). Departamento de Computación, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.
- [7] Black, P. (2006). Manhattan Distances. En: *Dictionary of Algorithms and Data Structures*. National Institute of Standard and Technology, United State of America.
- [8] Bonomo, F., Durán, G., Larumbe, F. & Marengo, J. (2009). Optimización de la Recolección de Residuos en la Zona Sur de la Ciudad de Buenos Aires. *Revista Ingeniería de Sistemas Volumen XXIII*.
- [9] Bonomo, F., Durán, G., Larumbe, F., & Marengo, J. (2012). A method for optimizing waste collection using mathematical programming: a Buenos Aires case study. *Waste Management & Research*, 30(3), 311-324.
- [10] Braier, G., Durán, G., Marengo, J. & Wesner, F. (2015). Una aplicación del problema del cartero rural a la recolección de residuos reciclables en Argentina. *Revista de Ingeniería de Sistemas Volumen XXIX*.
- [11] Cavallin, A., Vigier, H. & Frutos, M. (2015^a). Aplicación de un modelo CVRP-RB a un caso de Logística Inversa. En: *Anales XXVIII Encuentro Nacional de Docentes en Investigación Operativa, XXVI Escuela de Perfeccionamiento en Investigación Operativa y Red Iberoamericana de Evaluación y Decisión Multicriterio VIII*. Bahía Blanca, Argentina.
- [12] Cavallin, A., Vigier, H. & Frutos, M. (2015^b). Logística inversa y ruteo en el sector de recolección informal de residuos sólidos urbanos. En: *Avances en Gestión Integral de Residuos Sólidos Urbanos 2014-15*. Editado por N. M. Mazzeo and A. M. M. Muzlera Klappenbach. Instituto Nacional de Tecnología Industrial, pp. 37-49.
- [13] Dyson, R. G. (2001). Pitfalls and protocols in DEA. *European Journal of operational research*, 132(2), 245-259.
- [14] Gobierno de Chile, Comisión Nacional de Medio Ambiente. (2001). *Indicadores para gestión municipal de residuos sólidos*.
- [15] Larumbe, F. (2009). Optimización de la Recolección de Residuos en la Zona Sur de la Ciudad de Buenos Aires (Tesis de grado). Departamento de Computación, Facultad de

Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.

- [16] Méndez, A., Palumbo, D., Carnero, M. & Hernández, J. (2009). Algoritmos Meméticos Aplicados a la Resolución de un Problema de Ruteo de Vehículos Periódico. *Mecánica Computacional*, 2675-2685.
- [17] Méndez, A., Pontin, M., Ziletti, M., Carnero, M. & Hernández, J. (2004). Recolección de Residuos Patógenos. Un Enfoque Evolutivo Híbrido. *Mecánica Computacional*, 23, 3079- 3089.
- [18] Méndez, A., Simón, S., Palumbo, D., Chiachera, E. & Carnero, M. (2010). Dos Enfoques para la Solución del Problema de Ruteo De Vehículos (CVRP): Aplicación a un Caso Real de Recolección de Residuos. *Mecánica Computacional*, 29, 9367-9377.
- [19] Ministerio de Medio Ambiente, Wellington, New Zealand. (2000). Environmental Performance Indicators. Confirmed indicators for waste, hazardous waste and contaminated sites. Signposts for sustainability.
- [20] Puma-Chávez, A., Armijo-De Vega, C., Calderón-De la Barca, N., Leyva- Aguilera, J. C. & Ojeda-Benitez, S. (2011). Instrumento de evaluación para los programas de manejo de Residuos Domiciliarios. 3((1)).
- [21] Rodríguez Solórzano, C. (2002). Instituto Nacional Ecológico. Obtenido de http://www.ine.gob.mx/descargas/cuencas/ind_sust.pdf
- [22] Rossit, D. G., Broz, D., Rossit, D. A., Frutos, M. & Tohmé, F. (2015). Modelado de una red urbana de recolección de residuos plásticos en base a optimización multi-objetivo. En: Anales XXVIII Encuentro Nacional de Docentes en Investigación Operativa, XXVI Escuela de Perfeccionamiento en Investigación Operativa y Red Iberoamericana de Evaluación y Decisión Multicriterio VIII. Bahía Blanca, Argentina.
- [23] Schejtman, L. & Cellucci, M. (2014). Gestión integral de residuos sólidos urbanos. Políticas municipales que promueven la sustentabilidad. Buenas prácticas municipales.
- [24] Secretaria de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación Argentina. (2014). Sistema de indicadores de Desarrollo Sostenible. Séptima Edición. Ciudad autónoma de Buenos Aires.
- [25] Simón, S., Demaldé, J., Hernández, J. & Carnero, M. (2012). Optimización de recorridos para la recolección de residuos infecciosos. *Información Tecnológica*, 23(4), 125-132.
- [26] Villavicencio, G. J. D. & Didonet, S. R. (2009). Eco-eficiencia en la gestión de residuos municipales en Catalunya. *Revista de Administração da UFSM*,1(2).