

47

Fecha de presentación: julio, 2019
Fecha de aceptación: septiembre, 2019
Fecha de publicación: octubre, 2019

MEJORAMIENTO DE LA GESTIÓN INTEGRAL

DE LOS RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS EN EL CANTÓN DE QUEVEDO, ECUADOR

IMPROVEMENT OF THE INTEGRAL MANAGEMENT OF URBAN SOLID WASTE IN THE QUEVEDO CANTON, ECUADOR

Patricio Rubén Alcocer Quinteros¹

E-mail: palcocer@uteq.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0366-5529>

Omar Cevallos Muñoz¹

E-mail: ocevallos@uteq.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6926-4384>

José Knudsen González²

E-mail: knudsen@uclv.edu.cu

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5079-138X>

¹ Universidad Técnica Estatal de Quevedo. Ecuador.

² Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Santa Clara. Cuba.

Cita sugerida (APA, sexta edición)

Alcocer Quinteros, P. B., Cevallos Muñoz, O., & Knudsen González, J. (2019). Mejoramiento de la gestión integral de los residuos sólidos urbanos en el cantón de Quevedo, Ecuador. *Universidad y Sociedad*, 11(5), 362-367. Recuperado de <http://rus.ucf.edu.cu/index.php/rus>

RESUMEN

El presente trabajo tiene como propósito diseñar un modelo matemático con un enfoque multiobjetivo que permita mejorar la gestión integral de la cadena de suministros del proceso de recolección de residuos sólidos urbanos en el cantón de Quevedo en Ecuador. El modelo propuesto resuelve insuficiencias en la literatura científica y plantea generar información para la toma de decisiones por parte de las autoridades del cantón de Quevedo. Para lograrlo, se procede a hacer un diagnóstico de las condiciones actuales del proceso de recolección, transporte, transferencia y tratamiento de los residuos sólidos urbanos, luego se identifican los indicadores que servirán para medir la gestión actual del proceso de recolección de residuos sólidos urbanos, y posteriormente se elabora el modelo matemático multiobjetivo en el cual se plantean tres funciones objetivas cuya meta es la optimización del problema, considerando una serie de restricciones. El resultado obtenido se basa en rediseñar la cadena de suministro para la gestión de residuos sólidos urbanos logrando minimizar el costo, maximizar el ahorro del impacto ambiental y maximizar la satisfacción al cliente

Palabras clave: Cadenas de suministro, modelo matemático multi objetivo, impacto ambiental.

ABSTRACT

The purpose of this work is to design a mathematical model with a multi-objective approach to improve the integral management of the supply chain of the urban solid waste collection process in the canton of Quevedo in Ecuador. The proposed model resolves inadequacies in the scientific literature and proposes to generate information for the decision making by the authorities of the canton of Quevedo. To achieve this, a diagnosis is made of the current conditions of the process of collecting, transporting, transferring and treating urban solid waste, then identifying the indicators that will serve to measure the current management of the process of urban solid waste collection, and later a multi objective mathematical model is elaborated in which three objective functions are posed whose goal is the optimization of the problem, considering a series of restrictions. The result is based on redesigning the supply chain for the management of urban solid waste, achieving minimizing the cost, maximizing the environmental impact savings and maximizing customer satisfaction.

Keywords: Supply chain, multipurpose mathematical model, environmental impact.

INTRODUCCIÓN

La recolección de residuos sólidos domiciliarios, comerciales e industriales mezclados en una zona urbana es una tarea difícil y compleja, ya que éstos tienen múltiples formas de generarse y cada actividad humana es un punto de generación, ya sean las propiedades privadas, los espacios públicos e incluso las zonas deshabitadas. Los residuos generados por los grupos humanos siempre existieron, pero su presencia, en tanto problema ambiental, es un fenómeno reciente. La razón de los residuos sólidos urbanos se refiere explícitamente a dos fenómenos íntimamente relacionados: 1) la expansión humana que se expresa en la ocupación, explotación y predominio de la especie en prácticamente todos los ecosistemas y rincones del planeta y 2) la lógica de producción-consumo industrial-capitalista (Calva, 2014).

El manejo de los residuos sin control trae problemas para la salud y el ambiente, lo que causa riesgos importantes. Incluso en un contexto global, existen residuos que pueden viajar grandes distancias, aumentando la contaminación del planeta. Además, los residuos sólidos urbanos han adquirido características fisicoquímicas que hacen más difícil su degradación natural. Esto, en conjunto con la escasa cultura ambiental de la población y los cambios en los hábitos de consumo, han hecho que la recolección de los residuos se convierta en una tarea de grandes dimensiones que requiere un importante gasto de recursos (Couto & Hernández, 2012).

Esta recolección ha crecido de manera importante en los últimos años, al tiempo que las nuevas tecnologías para convertir los residuos en recursos, constituyen un desafío a resolver. Donde los residuos pueden convertirse en dinero, el problema de los residuos cobra vida y el escalamiento de este potencial vital genera posibilidades comerciales para fabricantes, comerciantes, ingenieros industriales y autoridades encargadas por ley de asegurar la disposición segura de la materia de desecho generada en su jurisdicción. La industria también parece ofrecer una posibilidad de redención a las problemáticas consecuencias del creciente nivel de consumo, tomado con frecuencia como indicativo de estándares de vida que sostienen la noción del crecimiento económico como bien social absoluto (Harvey, 2012).

La gestión de la recolección de los residuos sólidos urbanos básicamente está referida al conjunto articulado de acciones a desarrollar desde el ámbito económico, operativo, administrativo, social, de supervisión, monitoreo y educación que permitan el manejo de los residuos sólidos urbanos desde su generación hasta su disposición

final para obtener beneficios ambientales (Onofre, 2014; Zaman, 2014).

En el Ecuador, desde el año 2002 hasta el 2010 la situación a nivel nacional no había variado significativamente, de un total de 221 municipios, 160 disponían sus desechos en botaderos a cielo abierto, perjudicando y contaminando los recursos suelo, agua y aire; con la consiguiente afectación a la salud de la población y en especial de los grupos de minadores que trabajaban en condiciones inadecuadas. Los restantes 61 municipios, presentaban un manejo de sus desechos con insuficientes criterios técnicos, en sitios de disposición final parcialmente controlados. Bajo este contexto, el Gobierno Central a través de su Ministerio del Ambiente, en abril del año 2010, crea el Programa Nacional para la Gestión Integral de Desechos Sólidos (Ecuador Ministerio del Ambiente, 2016), con el objetivo primordial de impulsar la gestión de los residuos sólidos en los municipios del Ecuador, con un enfoque integral y sostenible; con la finalidad de disminuir la contaminación ambiental, mejorando la calidad de vida de los ciudadanos e impulsando la conservación de los ecosistemas; a través de estrategias, planes y actividades de capacitación, sensibilización y estímulo a los diferentes actores relacionados.

Todo lo anterior caracteriza la situación actual que originó la presente investigación, cuyo problema científico se resume como la necesidad de establecer un modelo que permita mejorar la gestión integral de la cadena de suministros del proceso de recolección de los residuos sólidos urbanos en el cantón de Quevedo ubicado en la provincia de Los Ríos en el Ecuador, sobre la base de las decisiones, táctico y operativas científicamente justificadas sujetas al ámbito económico, social y ambiental, a través de la modelación matemática multiobjetivo de los procesos de recolección, transporte, transferencia y tratamiento de los residuos sólidos urbanos.

DESARROLLO

El problema de la cadena de suministro del proceso de recolección de residuos sólidos urbanos en el cantón de Quevedo consiste en determinar la cantidad de unidades recolectoras – transportadoras y sitios de separación necesarios para cumplir con los requerimientos de costo, impacto ambiental y satisfacción de los clientes, que no han sido corregidos en los últimos años por las autoridades locales. Los participantes de esta cadena de suministro son generadores de residuos sólidos urbanos, el sitio de separación, el centro de tratamiento, el centro de compostaje, la disposición final, los clientes del centro de tratamiento y los clientes del centro de compostaje

(Bechtel & Jayaram, 1997; Stevens, 1989; Towil, 1992; Skjøtt Larsen, Schary, Hsuan Mikkola & Kotzab, 2007).

Para solucionar este problema se desarrolló un modelo de optimización multiobjetivo para el proceso de gestión integral de residuos sólidos urbanos, que considera varios productos, este modelo será una representación aproximada de la situación real, con la suficiente capacidad de explicar el comportamiento de la misma. Este modelo multiobjetivo se complementará con una serie de indicadores, que midieron el proceso de gestión integral de residuos sólidos de Quevedo desde el punto de vista económico, impacto ambiental y de satisfacción al cliente.

Construcción del modelo multiobjetivo para la cadena de suministros del proceso de recolección de los residuos sólidos urbanos

Una vez formulado el modelo y definida la red de la cadena de suministro del proceso de gestión integral de residuos sólidos urbanos en el cantón de Quevedo, se procedió a definir el conjunto de elementos que forman parte del modelo, así como las variables de decisión y los parámetros a considerar.

Se diseñaron un conjunto de restricciones que se asocian con las cantidades posibles a recuperar, las capacidades de los centros de tratamiento y compostaje así como del relleno sanitario, las cantidades de viajes entre cada uno de los elementos de la red estudiada, las demandas de los clientes de los centros de tratamiento y de compostaje, limitaciones con respecto a la cantidad de viajes que pueden realizar los medios de transporte disponibles, así como otras relacionadas con las variables de holgura que se agregan al modelo matemático. Las restricciones formuladas para el modelo son las siguientes:

- Restricciones asociadas con las cantidades posibles a recuperar.
- Restricción asociada a la capacidad de los centros de tratamiento, de compostaje y del relleno sanitario.
- Restricciones asociadas a la demanda de los clientes del centro de tratamiento y del centro de compostaje.
- Restricciones asociadas a las cantidades de viajes entre cada uno de los elementos de la red.
- Restricciones para que las variables de holgura solo completen la diferencia entre los números de viajes y estos sean números enteros.
- Restricción que limita el número de viajes por medio de transporte en el periodo.
- Restricción para forzar variables binarias a adquirir el valor de 1 cuando existe flujo a través de algún sitio de separación.

Lo primero que se hará es introducir las fórmulas matemáticas de cada función objetivo junto con las restricciones, considerando el método de la frontera de Pareto, el cual consiste en realizar una primera optimización en donde la función objetivo de costo será la principal considerándose las funciones objetivos de impacto ambiental y satisfacción al cliente como restricciones junto con las otras planteadas para el modelo de la cadena de suministro del proceso de gestión integral de residuos sólidos urbanos del cantón de Quevedo.

Diagnóstico de las condiciones actuales del proceso de recolección de residuos sólidos urbanos en el cantón de Quevedo.

Para el diagnóstico de las condiciones actuales del proceso de gestión integral de residuos sólidos urbanos en el cantón de Quevedo se procedió a aplicar ecuaciones, las cuales miden la gestión desde el punto de vista económico, de impacto ambiental y de satisfacción de los clientes. En relación a los costos, se buscó estimar los parámetros que forman parte de la expresión matemática que lo caracteriza, es así como a través de revisión de información registrada en la base de datos de la empresa EPMAGAQ y datos del Proyecto de la Mancomunidad Mundo Verde 2014-2016, se obtuvo la siguiente información (Tabla 1):

Tabla 1. Parámetros para evaluar el objetivo económico de la gestión actual de residuos sólidos urbanos en el cantón Quevedo.

Parámetro	Unidad	Valor
Cantidad de residuos recuperado	Toneladas/año	70.000
Cantidad de residuos tratados	Toneladas/año	58.800
Cantidad de residuos dispuestos finalmente	Toneladas/año	11.200
Costo de transportación promedio	\$/km	3
Distancias recorridas para recuperar y distribuir los residuos	Km	222.285
Costos fijos de recolección de residuos	\$/año	265.300
Costos fijos de tratamiento de residuos	\$/año	225.870
Costos fijos de disposición final de residuos	\$/año	237.500
Costo variable de recolección de residuos	\$/tonelada	10

Costo variable de tratamiento de residuos	\$/tonelada	323
Costo variable de disposición final de residuos	\$/tonelada	148
Costo total del proceso de recolección de residuos sólidos urbanos	\$/año	22.745.525

Para determinar el impacto ambiental se utilizó la matriz de Leopold, donde se puede observar que la puntuación acumulada de los impactos positivos del proceso de gestión integral de residuos sólidos urbanos en el cantón de Quevedo es inferior que los puntos acumulados de los impactos negativos, por lo tanto, se considera un aspecto negativo para la gestión. De acuerdo con los resultados se puede decir entonces que se deben revisar las acciones propuestas o etapas del proceso de gestión integral de residuos sólidos urbanos del cantón de Quevedo para identificar aquellas que sean susceptibles de mejora, de esa forma lograr un aumento en el valor del indicador, lo que garantizaría una disminución de los impactos negativos y un aumento o maximización de los impactos positivos. De los resultados de la matriz de Leopold, se identifica que la etapa de disposición final de los residuos sólidos urbanos es la que mayor impacto negativo genera, reflejando puntuaciones elevadas en todos los elementos de la matriz, que incluye afectación del suelo, atmósfera, agua, flora, fauna, uso de terreno, estéticos, culturales, infraestructura y relaciones ecológicas. Siguiendo en el orden de impactos negativos el proceso de recolección de los residuos sólidos, específicamente en los elementos de afectación a la atmósfera, y los procesos, así como en la flora y la fauna. Se observa también un alto impacto en las zonas residenciales y comerciales, como también en lo referente a las relaciones ecológicas.

Con respecto a los impactos positivos la etapa de tratamiento de residuos sólidos es la que mayor contribución hace, específicamente en todo lo que tiene que ver con suelos, agua, atmósfera y proceso, así como en los factores estéticos y culturales los cuales pueden ayudar a crear conciencia en cada uno de los participantes del proceso de gestión de forma tal que su apoyo al mismo se vea potenciado, logrando el incremento de los aportes o impactos positivos.

De acuerdo a las encuestas, se obtuvo que los resultados generales del indicador muestran que el grado de satisfacción por parte de los clientes de la empresa EPMAGAQ con respecto a la gestión integral de residuos sólidos urbanos en el cantón de Quevedo se puede considerar alto, pero si se observa cada uno de los atributos del indicador los relacionados con el control de malos olores y control de derrames de lixiviados y restos de residuos sólidos en

la vía pública son susceptibles de mejora ya que obtuvieron calificaciones bajas indicando poca satisfacción

Análisis del proceso optimizado de recolección de residuos sólidos urbanos en el cantón de Quevedo

Siguiendo con el proceso de estudio de la gestión integral de los residuos sólidos urbanos del cantón de Quevedo se hace el planteamiento de las mejoras del mismo y se aplica el modelo matemático formulado para tal fin. En el cantón de Quevedo la empresa EPMAGAQ es la encargada de prestar el servicio de recolección y traslado de los residuos sólidos urbanos así que los datos utilizados para el modelo multiobjetivo fueron tomados de esta.

Para el modelado del proceso de gestión integral de residuos sólidos urbanos en el cantón de Quevedo, también se buscó información sobre las cantidades recolectadas, de los sitios de separación de residuos sólidos existentes, de los centros de tratamiento, sobre la disposición final, de las plantas de compostaje, los medios que utilizan para transportar los residuos sólidos, así como de los clientes que poseen esta red de suministro. Para la estimación de los parámetros del modelo se acudió a la revisión de los datos históricos disponibles en las instalaciones que actualmente existen en el cantón de Quevedo y que tiene registrados la empresa EPMAGAQ. Una vez que se definieron las cantidades máximas de elementos de cada uno de los nueve conjuntos que contempla el modelo matemático y se elaboraron las matrices de datos necesarios para la aplicación del modelo, se procedió introducir en el programa Gams toda la información recolectada, se declararon las variables, se definieron los conjuntos, se introdujeron los parámetros, así como las matrices de datos. Finalmente se agregaron las tres funciones objetivo y las 23 restricciones, utilizando el criterio de la frontera de Pareto de forma tal que se considera como función objetivo principal la de minimización de costo, agregando las funciones de ahorro en impacto ambiental y la de satisfacción al cliente como restricciones paramétricas.

Para la optimización se llevó a cabo un proceso que involucró un bloque de 25 ecuaciones, 20 variables de decisión, utilizando el método de solución de MINLP (minimización en programación lineal) del Gams, se realizaron 81 iteraciones, el tiempo total invertido para el proceso de preparación de los datos en el programa, pruebas de las ecuaciones, más las iteraciones realizadas fue de cinco días de trabajo. Los resultados de la optimización generaron 81 escenarios posibles, que se corresponden a las 81 iteraciones realizadas.

En la figura 1, se muestra la comparación de los costos para cada uno de los 10 escenarios que se formularon, se observa que el escenario 5 presenta el mejor desempeño

ya que posee el mínimo costo, siendo bastante notable la diferencia en comparación con el resto de los escenarios planteados.



Figura 1. Costo de operación anual de la gestión integral de residuos sólidos urbanos.

En la Figura 2, si se comparan los escenarios desde el punto de vista del ahorro del impacto ambiental se observa un comportamiento similar que al de los costos, el escenario 5 es el que tiene mayor puntuación que los demás, lo que indica que se está maximizando los puntos obtenidos con respecto a este indicador. La diferencia entre el escenario 5 y los demás es menos pronunciada que con respecto a los costos, pero si se visualiza que este es favorecido por la optimización.

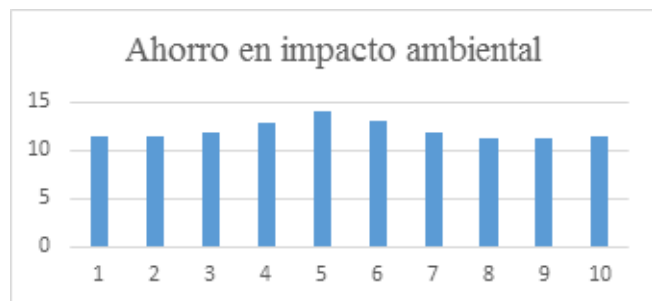


Figura 2. Ahorro en impacto ambiental de la gestión integral de residuos sólidos urbanos.

Siguiendo con la comparación entre los escenarios planteados se observa la satisfacción al cliente, planteada como la maximización de los residuos sólidos recolectados y tratados tanto en el centro de tratamiento como en el centro de compostaje. Se puede ver de nuevo en la figura 3, que el escenario 5 sale favorecido ya que es el que posee un mayor valor de cantidad de residuos sólidos que se recolectan y son tratados en ambos centros.



Figura 3. Satisfacción al cliente de la gestión integral de residuos sólidos urbanos.

La idea de la optimización es identificar el escenario que ofrezca una combinación óptima de los indicadores que se utilizaron para medir la gestión integral de residuos sólidos urbanos en el cantón de Quevedo, y como se observa, esta característica la cumple el escenario 5, que es el que ofrece una combinación de costo mínimo, máximo ahorro en impacto ambiental y máxima satisfacción al cliente, adicionalmente es el escenario que tiene la mayor probabilidad de ocurrencia según los resultados obtenidos.

A continuación, en la Tabla 2, se muestra la comparación de la situación actual con la solución óptima, esto luego de obtener los resultados.

Tabla 2. Comparación de la situación actual con la solución óptima.

Indicadores	Cadena de suministro actual	Cadena de suministro óptima	Porcentaje de mejora (%)
Costo de operaciones (dólares)	22.745.525	1.013.400	-95,54
Ahorro del impacto ambiental (puntos)	0,40	13,945	+3.386,25
Satisfacción al cliente (toneladas)	70.000	75.124	+7,32

Se puede observar una mejoría de los parámetros estudiados, siendo el ahorro en impacto ambiental el cambio más notable, el cual presentó un incremento de 3.386,25%, así mismo la disminución de costos en un 95,54% y un aumento en la satisfacción del cliente de 7,32%.

El escenario 5 de la optimización corresponde a una cadena de suministro compuesta por 20 sitios en donde la población urbana dispone los residuos sólidos que se generan, tres sitios de separación de residuos, un centro de tratamiento para el plástico, así como el papel y cartón, un centro de compostaje para residuos orgánicos, un relleno sanitario, y 14 clientes para cada uno de los centros de la red. Por lo tanto, se puede decir que la cadena de

gestión integral de residuos sólidos urbanos en el cantón de Quevedo debería ser modificada para agregar dos sitios más de separación de residuos sólidos que permita aumentar las cantidades recolectas, y que se agilicen los procesos de clasificación de los residuos sólidos para enviarlos a las localidades respectivas según su tipo, estos dos sitios se corresponden a dos instalaciones de la empresa EPMAGAQ que cumplen con las condiciones necesarias para realizar las actividades de clasificación de residuos sólidos urbanos.

Se comprueba entonces que el modelo matemático diseñado para describir matemáticamente la cadena de gestión integral de residuos sólidos urbanos en el cantón de Quevedo sirve para explicar su comportamiento y para obtener una mejor configuración de la red que permita minimizar los costos de operación, maximizar la satisfacción al cliente y el ahorro en impacto ambiental.

CONCLUSIONES

El estudio de la situación actual de la cadena de suministro para la gestión integral de residuos sólidos urbanos en el cantón de Quevedo demuestra la necesidad de rediseñar la cadena de suministro, considerando un conjunto de funciones objetivos, variables de decisión, parámetros, restricciones y suposiciones que permitan modelar la cadena estudiada y que sea útil para rediseñarla.

A partir de la aplicación de modelo matemático multiobjetivo se logró plantear 10 escenarios de optimización, que muestran los valores de costo, ahorro en impacto ambiental y satisfacción al cliente distintos para cada uno de estos, en donde se puede verificar cuál de todos es el que mejores características tiene, resultando el escenario 5 como el mejor ya que es el que tiene la combinación de mínimo costo, máximo ahorro en impacto ambiental y máxima satisfacción al cliente, además al ser comparado con la situación actual también se observa mejoras sustanciales con respecto a estos tres parámetros.

Se logró la comprobación de la utilidad que tiene en la práctica el modelo matemático multiobjetivo que se propuso en la cadena de suministro para la gestión integral de residuos sólidos urbanos en el cantón de Quevedo, siendo una herramienta que puede ser aplicada para el rediseño de otras cadenas de suministros en otros cantones del Ecuador siempre y cuando estas cumplan con los supuestos que se aplican a este modelo.

Se comprueba con los resultados de la optimización que existen otras configuraciones de la cadena de suministros para la gestión integral de residuos sólidos urbanos que tienen mejor desempeño que la configuración actual por lo que se puede rediseñar.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bechtel, C., & Jayaram, J. (1997). Supply Chain Management: a strategic perspective. *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, 8(1), 15-34.
- Calva, R. (2014). Diagnóstico de la Gestión de Residuos Sólidos Urbanos en el Municipio de Mexicali, México: Retos para el Logro de una Planeación Sustentable. *Información Tecnológica*, 25(3), 718-764. Recuperado de <https://scielo.conicyt.cl/pdf/infotec/v25n3/art09.pdf>
- Couto, I., & Hernández, A. (2012). Participación y rendimiento de la iniciativa privada en la gestión integral de los residuos sólidos urbanos en la frontera México-Estados Unidos. *Gestión y Política Pública*, 21(1). Recuperado de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=13323078007>
- Ecuador. Ministerio del Ambiente. (2016). Programa Nacional para la Gestión Integral de Desechos Sólidos. Quito: MAG.
- Harvey, P. (2012). Políticas de la materia y residuos sólidos: descentralización y sistemas integrados. *Anthropologica*, 30(30), 254-260. Recuperado de <http://revistas.pucp.edu.pe/index.php/anthropologica/article/view/4429/4404>
- Onofre, P. (2014). *Caracterización de los residuos sólidos urbanos generados en la cabecera municipal de Mazatepec, Morelos y sus potenciales efectos a la salud*, Cuernavaca. Cuernavaca: Universidad del Valle de Cali.
- Skjøtt Larsen, T., Schary, P. B., Hsuan Mikkola, J., & Kotzab, H. (2007). Managing the Global Supply Chain. Frederiksberg: *Copenhagen Business School Press*.
- Stevens, G. C. (1989). Integration of the supply chain. *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, 19 (8), 3-8. Recuperado de <https://pdfs.semanticscholar.org/792f/f5a74aac0672b52805198942a6051fd0caf1.pdf>
- Towil, D. R. (1992). Industrial dynamics simulation models in the design the supply chain. *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management*, 22(5), 3-13. Recuperado de <https://www.emeraldinsight.com/doi/10.1108/09600039210016995>
- Zaman, A. (2014). Measuring waste management performance using "Zero Waste Index": the case of Adelaide, Australia. *Journal of Cleaner Production*, 66, 407-419. Recuperado de <https://espace.curtin.edu.au/handle/20.500.11937/54995>