



## Sustainable design of reverse supply chain for solid waste in Mexico

Javier Gómez-Maturano<sup>ORCID</sup>

### ¿Cómo citar este artículo?

Gómez-Maturano, J. (2020). Sustainable design of reverse supply chain for solid waste in Mexico. *Cuadernos de Administración*, 36(67), 31-47. <https://doi.org/10.25100/cdea.v36i67.8421>

### Resumen

Las cadenas de suministro deben alinear sus objetivos con los del desarrollo sostenible y modificar las prácticas que comprometen la capacidad de las generaciones futuras de satisfacer sus necesidades. Una de las prácticas que deben modificarse es la generación de grandes volúmenes de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) resultado de un proceso de producción lineal. Las cadenas de suministros tradicionales son corresponsables de este problema. Un proceso productivo circular en el que el consumo de recursos naturales se reduzca es posible a través de Cadenas de Suministro Inversas. Para ello se hace necesario contar con herramientas para el diseño sostenible de redes de valorización de RSU. El objetivo de este trabajo es proponer un procedimiento de ingeniería de sistemas que sirva a dicho propósito. La aportación principal es la propuesta de una forma explícita y concreta de diseñar conceptualmente CSI, útil para los tomadores de decisiones. El procedimiento consta de cuatro etapas interconectadas que constituyen un sistema interactivo que permiten el diseño desde el planteamiento del problema hasta su validación. El procedimiento se aplica para diseñar una CSI para RSU en el municipio mexicano de Netzahualcóyotl. La CSI diseñada es capaz de mover un volumen de 420 toneladas diarias de RSU en un área urbana de apenas 50 kilómetros cuadrados. El alcance del presente trabajo es un diseño conceptual que requiere aún de su prueba en campo para validar los resultados estimados y hacer un proceso de realimentación que permita fortalecer el procedimiento de diseño conceptual.

**Palabras clave:** Diseño de cadena de suministro, Cadena de suministro inversa, Desarrollo sostenible, Residuos sólidos, Responsabilidad social, Reciclaje, Diseño sostenible.

### Abstract

Supply chains must align their goals with those of sustainable development and modify practices that compromise the ability of future generations to meet their needs. One of the practices that must be modified is the generation of large volumes of Municipal Solid Waste [MSW] that results from a linear production process. Traditional supply chains are jointly responsible for this problem. A circular production process in which the consumption of natural resources is reduced is possible through Reverse Supply Chains. For this, it is necessary to have tools for the sustainable design of MSW recovery networks. The objective of this work is to propose a systems engineering procedure that serves this purpose. The main contribution is the proposal of an explicit and concrete way to conceptually design RSC, useful for decision makers. The procedure consists of four interconnected stages that constitute an interactive system that allow the design from the problem formulation to its validation. The procedure is applied to design a RSC for MSW in the Mexican municipality of Netzahualcoyotl. The designed RSC can move a volume of 420 tons of MSW per day in an urban area of just 50 square kilometers. The scope of this work is a conceptual design that still requires field testing to validate the estimated results and make a feedback process that allows strengthening the conceptual design procedure.

**Keywords:** Supply chain design, Reverse supply chain, Development sustainable, Solid waste, Conceptual design, Social responsibility, Recycling, Sustainable design.

1 **1. Introducción**

2  
3 Los problemas de la Gestión de la Cadena de Suministro [GCS] se han diversificado al  
4 incluir los retos medioambientales y sociales contemporáneos, dando cabida a los  
5 enfoques de sostenibilidad en la cadena de suministro (Bendul, Rosca, y Pivovarova,  
6 2017). El cambio climático, el agotamiento de los recursos naturales, la búsqueda de la  
7 eficiencia energética, el aseguramiento del estado de derecho y la lucha contra la  
8 discriminación, la inseguridad y la corrupción comienzan a formar parte de los  
9 problemas a resolver en el campo de la GCS (Rajeev, Pati, Padhi, y Govindan, 2017).  
10 Otros tópicos periféricos, que inciden en el mundo de los negocios y la GCS son los  
11 flujos migratorios extraordinarios, los cambios en los paradigmas políticos, la fractura  
12 de bloques comerciales y hasta la viralización de las noticias en las redes sociales que  
13 también comienza a despertar el interés de las empresas y sus cadenas de suministro  
14 (KPMG, 2018).

15  
16 Corregir las operaciones de la CS para hacer un uso óptimo de los recursos y atenuar  
17 sus impactos negativos es el enfoque dominante en la GCS para responder a los  
18 problemas contextuales (Baumgartner, 2011); sin embargo, se ha señalado que el uso  
19 eficiente de recursos no es suficiente para contribuir al desarrollo sostenible desde la  
20 GCS (Schaltegger y Burritt, 2014). De acuerdo con Gómez Maturano (2018), los  
21 objetivos del desarrollo sostenible han permeado en la GCS principalmente con un  
22 enfoque de sostenibilidad débil, limitando la inclusión de la sostenibilidad a niveles de  
23 desempeño táctico-operativo, en lugar de permitir una visión estratégica hacia la  
24 sostenibilidad. La GCS se está modificando para contribuir a la solución de los  
25 problemas contemporáneos en el ámbito medioambiental y social (Seuring, 2013), lo  
26 cual es favorable aún si el enfoque prevaleciente es de una sostenibilidad débil.

27  
28 Uno los problemas contemporáneos en los que la GCS puede contribuir al desarrollo  
29 sostenible es la generación de grandes cantidades de Residuos Sólidos Urbanos [RSU]  
30 en las grandes ciudades. En 2015 se producían alrededor de 680 millones de toneladas  
31 de desechos en las ciudades al año y se estimaba que para los próximos 10 años la cifra  
32 llegaría a 2, 200 millones de toneladas anuales (BM, 2016). Particularmente en México,  
33 la generación de RSU se ha incrementado en más del doble, pasando de 60 mil  
34 toneladas diarias en 1990, a 145 mil en 2015 (SEMARNAT, 2013, 2016).

35  
36 La generación de RSU se asocia a la estructura tradicional de la CS: los bienes son  
37 producidos a partir de materias primas vírgenes, vendidos, utilizados y finalmente  
38 desechados como residuos (Ellen Macarthur Foundation, 2016). Actualmente, el ritmo  
39 de consumo de recursos naturales es 1.5 veces más rápido que lo que la naturaleza  
40 tarda en renovarlos (PNUMA OMS, 2015). En Europa, se estima que el reciclaje de  
41 materias y la recuperación de energía basada en residuos capturan sólo el 5 % del valor  
42 original de las materias primas, mientras que el 31 % de los alimentos se desechan a lo  
43 largo de la CS (Ellen Macarthur Foundation, 2016).

44  
45 Por ello, es alentador observar el crecimiento en la investigación de las cadenas de  
46 suministro de ciclo cerrado (Govindan, Soleimani, y Kannan, 2015) que buscan

***¿Cómo citar este artículo?***

## Versión evaluada

47 mantener constante la cantidad de materia y energía que ingresa a una CS. Así mismo,  
48 se ha incrementado la investigación en Cadenas de Suministro Inversas [CSI] para la  
49 recuperación de residuos, lo que contribuye al fortalecimiento de la economía circular  
50 (Agrawal, Singh, y Murtaza, 2015).

51  
52 Para hacer una reestructuración de los modelos de producción y de sus CS tradicionales  
53 debe tenerse en cuenta que la corrección de un sistema, como lo es la CS tiene un  
54 límite, que es su funcionamiento óptimo con el que fue diseñado el sistema (Blanchard  
55 y Blyler, 2016). Una CS diseñada bajo los objetivos tradicionales de la GCS tiene una  
56 capacidad reducida de mejora en términos sostenibles, puesto que el diseño está  
57 enfocado en el desempeño económico.

58  
59 El objetivo de este trabajo es proponer un procedimiento de diseño conceptual basado  
60 en Ingeniería de Sistemas para el diseño de CSI de RSU valorizables con un enfoque de  
61 sostenibilidad débil. La particularidad de esta propuesta es plantear el modelado de  
62 sistemas conceptuales como una estrategia de diseño de CSI considerando una visión  
63 técnica económica interna, para el desempeño del sistema, y la interacción de la CSI  
64 con sus entornos medioambientales y sociales, como una forma de transitar a la  
65 sostenibilidad. Este documento se inscribe en la conversación actual sobre el diseño de  
66 cadenas de suministro sostenibles partiendo del modelado de sistemas conceptuales, y  
67 continua la discusión sobre diseño, modelado y validación de CS presente en Bendul *et*  
68 *al.* (2017), Schaltegger y Burritt (2014), Abdala y Barbieri (2014), Seuring (2013) y  
69 Hassini, Surti y Searcy (2012).

70

## 71 **2. Marco Teórico**

72

73 Bajo un modelo de economía lineal, la CS se encarga de la producción de bienes y  
74 servicios orientados al consumo, tomando de la naturaleza materia y energía necesarios  
75 para satisfacer las necesidades y expectativas del cliente. Una vez que el cliente  
76 concluye con el consumo, al llegar al final de la vida útil del producto, este se convierte  
77 en un residuo destinado al abandono por su productor o poseedor, constituyendo un  
78 desperdicio de recursos con altos impactos en los entornos económico, ambiental y  
79 social. Una vez que el producto se desecha, ingresa a un sistema de manejo de RSU  
80 para conducirlo a disposición final (tiraderos a cielo abierto o rellenos sanitarios). El  
81 patrón de producción de la economía lineal se ha modificado muy poco desde los últimos  
82 200 años (GRI, 2015) y es la forma que adopta la CS tradicional (Chopra y Meindl,  
83 2013).

84

85 La CS tradicional o directa incluye a todas aquellas partes involucradas de manera  
86 directa o indirecta en las actividades de los procesos de aprovisionamiento, producción  
87 y distribución de bienes y servicios (Chopra y Meindl, 2013). A través de esta CS se da  
88 un flujo físico de bienes, materia prima, inventario en proceso y productos terminados,  
89 además de la información relacionada a estos (Bowersox, Closs, y Cooper, 2007).

90

91 Algunos autores conceptualizan la CS como un sistema (Chopra y Meindl, 2013;  
92 Bowersox *et al.*, 2007; Jiménez-Sánchez y Hernández-García, 2002), lo que concuerda

### **¿Cómo citar este artículo?**

Gómez-Maturano, J. (2020). Sustainable design of reverse supply chain for solid waste in Mexico.  
*Cuadernos de Administración*, 36(67), 31-47. <https://doi.org/10.25100/cdea.v36i67.8421>

## Versión evaluada

93 con la visión propia en este trabajo. Bajo una visión de ingeniería de sistemas, un  
94 sistema comprende una combinación compleja de recursos (en forma de seres humanos,  
95 materiales, equipos, hardware, software, instalaciones, datos, información, servicios,  
96 etc.), integrados de tal manera que cumplen una función específica, o una serie de  
97 funciones, con el objetivo de responder a las necesidades identificadas (Blanchard y  
98 Blyler, 2016). Los recursos involucrados en el flujo de materiales e información en la  
99 CS son bastos; pero se concentran tradicionalmente en tres funciones: aprovisionar,  
100 producir y distribuir (Chopra y Meindl, 2013). Así, los agentes se agrupan a partir de  
101 su función de aprovisionamiento en proveedores de distintos niveles, según la relación  
102 que guarden con una empresa focal. Los agentes encargados de la fabricación de un  
103 producto, componente o ensamble desarrollan la función de producción. Los  
104 distribuidores son agentes que intervienen en la colocación del producto terminado en  
105 los mercados de consumo. Los flujos directos de bienes se dan a partir de esta  
106 estructura funcional de la CS tradicional.

107

108 De forma disruptiva al flujo del modelo lineal, las CSI incluyen los procesos necesarios  
109 para recuperar un producto usado de un cliente y reutilizarlo (Guide, Jayaraman y  
110 Linton, 2003). La CSI consiste en la serie de actividades necesarias para recuperar  
111 productos al final de su vida, desde los clientes, ya sea para las actividades de  
112 recuperación de su valor sobrante para el mercado, o para eliminarlos apropiadamente  
113 (Nakashima y Gupta, 2013). En este trabajo se conceptualiza la CSI como la serie de  
114 procesos y operaciones necesarias para recuperar, post-consumo, los productos usados,  
115 sus componentes o materiales asociados para valorizarlos, lo que implica reutilizarlos,  
116 reciclarlos, restaurarlos, re-manufacturarlos o canibaizarlos (Guide *et al.*, 2003; Kinobe,  
117 Gebresenbet, y Vinnerås, 2012; Nakashima y Gupta, 2013).

118

119 Agrawal *et al.* (2015) identifican las siguientes operaciones de la CSI:  
120 aprovisionamiento o adquisición de residuos, recolección (acumulación), inspección y  
121 clasificación, almacenamiento, valorización (reparación, reuso, remanufactura o  
122 reciclaje) o disposición final. Sin embargo, como bien lo establecen Ilgin y Gupta (2013),  
123 las operaciones de la CSI dependen del tipo de residuo que se maneje.

124

125 En este trabajo se establecen cuatro funciones para las CSI orientadas a la valorización  
126 de RSU: generación en el consumo final, incluye las actividades desarrolladas en las  
127 fuentes de generación de RSU, en las que los materiales son identificados como sin  
128 ningún valor adicional una vez que el consumo del producto original se realiza,  
129 adquisición, se concentra en la recogida de los residuos producidos y almacenados por  
130 las distintas fuentes de generación, a partir de la infraestructura de manejo de basura;  
131 valorización de RSU, mediante tecnología y procesos industrializados, los materiales  
132 adquiridos se valorizan para ser reincorporados a las cadenas de suministro;  
133 reintegración, dirige el flujo de productos recuperados a las diferentes fases de una CS  
134 tradicional, se asemeja al proceso de distribución de la CS directa. Estas funciones se  
135 muestran en la parte inferior de la Figura 1, en ellas se presenta el flujo inverso de  
136 materiales.

137

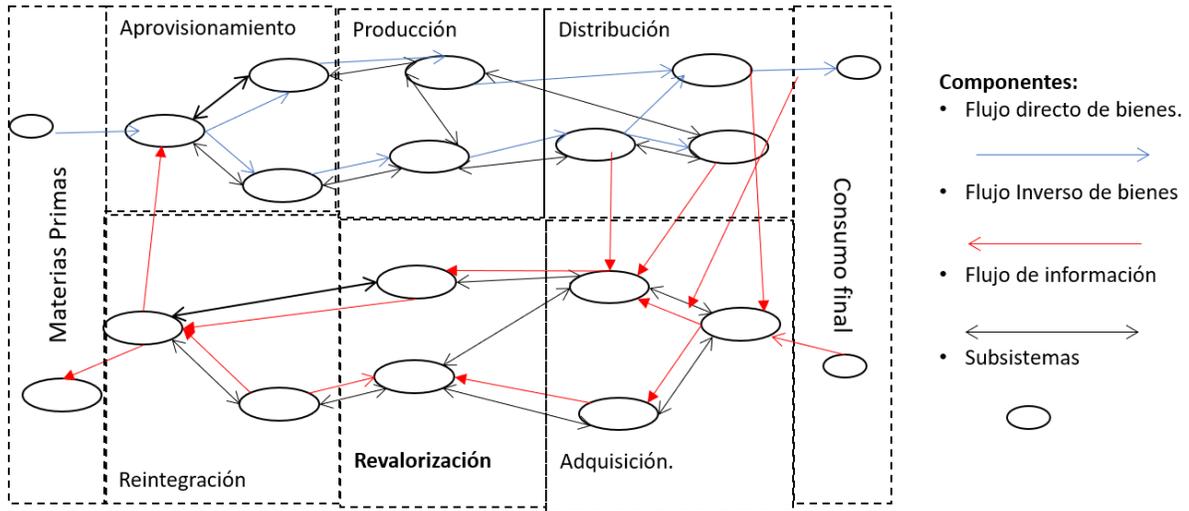
### **¿Cómo citar este artículo?**

Gómez-Maturano, J. (2020). Sustainable design of reverse supply chain for solid waste in Mexico.  
*Cuadernos de Administración*, 36(67), 31-47. <https://doi.org/10.25100/cdea.v36i67.8421>

138

**Figura 1. Modelo de Cadena de suministro de ciclo cerrado**

139



140

141

142

143

Fuente: Elaboración propia

144 La Figura 1 constituye un modelo de CS de ciclo cerrado, en el que se presenta un flujo  
 145 circular continuo de materiales, y la generación y recuperación de valor, a través de los  
 146 canales directos e inversos. Un modelo de economía circular sólo puede materializarse  
 147 a través de la sincronización entre CS tradicionales y CSI (Govindan *et al.*, 2015). Se  
 148 estima que a escala mundial los ahorros para las empresas que adoptan modelos de  
 149 economía circular es de cientos de miles de millones de dólares al año (PNUMA OMS,  
 150 2015).

151

152 A partir de la Figura 1 se establece que la disrupción entre el modelo de economía lineal  
 153 y su transmutación en modelos de economía circular sostenibles implica la recuperación  
 154 de los residuos post consumo a través de CSI. Los trabajos de Lacy y Rutqvist (2015) y  
 155 Veleva y Bodkin (2018) también se enfocan a la materialización de esta disrupción entre  
 156 lo lineal y lo circular. Para hacer esta transformación posible, además de contar con una  
 157 industria de valorización sólida, debe contarse con un sistema de adquisición de RSU  
 158 que suministre a dicha industria de forma sostenible. El marco normativo para la CSI  
 159 de RSU valorizables debe ser el desarrollo sostenible.

160

161 La *World Commission on Environment and Development* señala como sostenibilidad el  
 162 uso de recursos para satisfacer las necesidades del presente sin comprometer la  
 163 habilidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades (WCED,  
 164 1987 citada por Winter y Knemeyer, 2013). En el campo de la GCS, la dimensión  
 165 medioambiental incluye un grupo de objetivos, planes y mecanismos que promuevan  
 166 responsabilidad medioambiental y alientan el desarrollo y difusión de tecnologías  
 167 amigables con el medio ambiente (Winter y Knemeyer, 2013). Además, es importante  
 168 el impacto de la empresa u organización en los sistemas sociales dentro de los cuales  
 169 opera (GRI, 2015). La sostenibilidad social refiere a condiciones de trabajo, diversidad,

**¿Cómo citar este artículo?**

Gómez-Maturano, J. (2020). Sustainable design of reverse supply chain for solid waste in Mexico. *Cuadernos de Administración*, 36(67), 31-47. <https://doi.org/10.25100/cdea.v36i67.8421>

## Versión evaluada

170 conexión dentro y fuera de la comunidad, calidad de vida, etc. (Gimenez y Tachizawa,  
171 2012). El éxito a largo plazo y la competitividad es la base de la dimensión económica  
172 (Winter y Knemeyer, 2013); en contraste con las dimensiones medioambiental y social,  
173 lo económico es cuantitativo y se enfoca al uso eficiente de recursos y al retorno de la  
174 inversión.

175

176 Para Carter y Rogers (2008) citado por Varsei, Soosay, Fahimnia, y Sarkis (2014), la CS  
177 sostenible es la integración estratégica y transparente, así como el logro de los objetivos  
178 sociales, medioambientales y económicos de una organización en la coordinación  
179 sistémica de los principales procesos empresariales inter-organizacionales para  
180 mejorar el desempeño económico a largo plazo de la empresa individual y su CS.

181

182 Tomando como marco de diseño estos requerimientos de sostenibilidad para una CSI,  
183 en este trabajo se hace un diseño conceptual a partir de la adaptación del proceso de  
184 ingeniería de sistemas de Blanchard y Blyler (2016). El procedimiento de diseño  
185 conceptual consiste esencialmente en la construcción de sistemas conceptuales  
186 alternativos que sean solución a un problema de diseño planteado a partir de las  
187 especificaciones, requisitos y necesidades planteadas esquemas (Horvatz, 2005). El  
188 diseño conceptual sintetiza la solución a través de conceptos, expresados en forma de  
189 esquemas con elementos interconectados que describen el funcionamiento del sistema  
190 a diseñar (Horvatz, 2005). El enfoque de ingeniería recurre continuamente a  
191 construcciones intelectuales para resolver los problemas que enfrenta, lo que implica  
192 una mezcla imaginativa de conocimiento previo, conocimiento del funcionamiento de la  
193 realidad e información obtenida a partir de observaciones reales (Miser, 1993).

194

### 195 **3. Metodología**

196

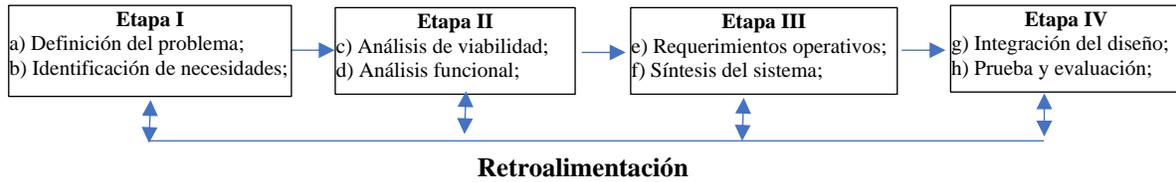
197 El procedimiento de Ingeniería de Sistemas [PIS] para el diseño conceptual de CSI de  
198 RSU valorizables en un marco de sostenibilidad se muestra en la **Figura 2**. El PIS  
199 incluye una definición inicial del problema y la identificación de una necesidad del  
200 consumidor final, un análisis de factibilidad, el desarrollo de requisitos operativos del  
201 sistema, la realización de un análisis funcional. Posteriormente, existe el proceso  
202 iterativo de evaluación y validación, y la incorporación de cambios para la mejora del  
203 producto (que puede ser por sí mismo un proceso) según sea necesario. Aunque el  
204 procedimiento está más dirigido a las primeras etapas del diseño y desarrollo del  
205 sistema, la consideración de las actividades en las últimas fases de producción (o  
206 construcción), la utilización operativa, el mantenimiento y soporte del sistema, así como  
207 prácticas de eliminación; son esenciales para comprender las consecuencias de las  
208 decisiones que al respecto se van tomando, así como el establecimiento de pautas y  
209 puntos de referencia para el futuro. En otras palabras, el ciclo de retroalimentación  
210 (como se identifica en la Figura 2) es crítico y es una parte integral del PIS.

211

#### **¿Cómo citar este artículo?**

Gómez-Maturano, J. (2020). Sustainable design of reverse supply chain for solid waste in Mexico.  
*Cuadernos de Administración*, 36(67), 31-47. <https://doi.org/10.25100/cdea.v36i67.8421>

**Figura 2. Procedimiento para el diseño conceptual basado en Ingeniería de Sistemas**



**Fuente:** Basado en Blanchard y Blyler (2016).

### a. Definición de un problema y análisis de necesidades

En esta etapa se identifica una "insatisfacción" o "deseo" de algo y se basa en una deficiencia real (o percibida). Aquí se presenta una descripción completa del problema en términos cualitativos y cuantitativos específicos, con suficiente detalle como para justificar el avance hacia el próximo paso. Más específicamente, se debe plantear la siguiente pregunta ¿cuál es la naturaleza y la magnitud del problema, y cuáles son los riesgos asociados si el problema no se aborda?

### b. Identifican de necesidades

Se realiza un análisis de necesidades, con el objetivo de traducir un "deseo" ampliamente definido en uno o varios requisitos más específicos con respecto al nivel del sistema. El objetivo básico es lograr un análisis de necesidades de manera satisfactoria, el cual se puede realizar mejor a través de un enfoque amplio que involucre al cliente, el consumidor (o usuario) final (si es diferente del cliente), el contratista principal o productor y los principales proveedores (según corresponda). Para esto, se emplea métodos como la realización de encuestas y entrevistas, la utilización de listas de verificación adecuadas, la aplicación de herramientas de análisis de procesos, y otras técnicas y métodos relacionados.

### c. Análisis de viabilidad

A través del análisis de necesidades, se identifican las funciones que debe realizar un sistema. Por un lado, puede haber una sola función. Por otro, puede haber múltiples funciones que realizar, algunas primarias y otras secundarias. Para garantizar que se establece un buen concepto de diseño desde el principio, se deben identificar todas las funciones posibles, y se deben seleccionar las funciones más rigurosas como base, para definir los requisitos de diseño a nivel del sistema. Es importante que se aborden todas las posibilidades para garantizar que se seleccione el enfoque técnico general adecuado al considerar el diseño. Considerando que el diseño parte de lo general a lo particular, de lo estratégico a lo operativo, hacer un énfasis en la parte técnica del diseño permite tener elementos concretos de la operación de la CS.

#### **¿Cómo citar este artículo?**

257 **d. Análisis funcional**

258

259 Un elemento esencial del diseño conceptual y preliminar es el desarrollo de una  
260 descripción funcional del sistema que sirva de base para la identificación de los recursos  
261 necesarios para que el sistema logre sus metas. En este punto, el objetivo es especificar  
262 el "qué" y no el "cómo"; es decir, lo que se necesita lograr en comparación con cómo se  
263 debe hacer. El análisis funcional es un proceso iterativo de desglose de requisitos desde  
264 el nivel del sistema hasta el subsistema, y en la medida de la estructura jerárquica que  
265 sea necesaria para identificar los criterios y restricciones del diseño para los diversos  
266 elementos del sistema.

267

268 **e. Requerimientos operativos**

269

270 Una vez definida la necesidad básica y la selección de un enfoque de diseño técnico  
271 factible, es necesario proyectar esta información a través de una descripción más  
272 completa de los requisitos operacionales anticipados del sistema. El objetivo es reflejar  
273 las necesidades del consumidor en términos de implementación del sistema, utilización,  
274 efectividad y cumplimiento de la misión deseada.

275

276 **f. Síntesis del sistema, análisis y optimización del diseño**

277

278 La síntesis se refiere a la combinación y estructuración de componentes, de tal manera  
279 que representa una configuración factible del sistema, está relacionada con el diseño.  
280 Inicialmente, la síntesis se emplea para desarrollar conceptos preliminares y establecer  
281 relaciones básicas entre los diversos componentes del sistema. Más tarde, cuando se  
282 ha desarrollado suficiente descomposición y definición funcional, la síntesis se utiliza  
283 para definir aún más los "cómo" en respuesta a los requisitos "qué". La síntesis implica  
284 la selección de una configuración que puede ser representativa de la forma que el  
285 sistema tomará en última instancia, aunque una configuración final ciertamente no se  
286 debe suponer en este punto.

287

288 **g. Integración del diseño**

289

290 El objetivo, desde una perspectiva de ingeniería de sistemas, es garantizar que los  
291 especialistas adecuados estén disponibles en el momento requerido y que sus  
292 contribuciones individuales estén integradas de manera adecuada en el todo. La  
293 selección de especialistas de dominio depende en gran medida de los requisitos  
294 específicos desarrollados a través del proceso de asignación y análisis funcional.

295

296 **h. Prueba y evaluación del sistema (validación)**

297

298 El objetivo es adquirir un alto grado de confianza, tan pronto como sea posible en el  
299 ciclo de vida, que el sistema finalmente funcionará según lo previsto. La adquisición de  
300 esta confianza, a través de una réplica física del sistema (y / o sus componentes), puede  
301 ser bastante costoso. Hoy en día hay muchas funciones que ahora se pueden realizar

***¿Cómo citar este artículo?***

Gómez-Maturano, J. (2020). Sustainable design of reverse supply chain for solid waste in Mexico.  
*Cuadernos de Administración*, 36(67), 31-47. <https://doi.org/10.25100/cdea.v36i67.8421>

302 con una simulación computarizada que anteriormente requería una simulación física  
303 del sistema, un modelo de prototipo de preproducción o ambos.

304

#### 305 **4. Resultados y discusión**

306

307 El caso de aplicación del PIS es una CSI enfocada a la adquisición de RSU para su  
308 valorización, la cual debe operar de forma sostenible en el municipio mexicano de  
309 Netzahualcóyotl. Territorialmente, Netzahualcóyotl se encuentra dividido en 179  
310 Unidades Geoestadísticas Básicas [AGEB]. El AGEB constituye la unidad básica del  
311 marco geoestadístico empleado por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e  
312 Informática (INEGI) (INEGI, 2010).

313

#### 314 **4.1. Etapa 1. Definición del problema de diseño e identificación de necesidades**

315

316

##### 317 **a. Definición del problema**

318

319 Netzahualcóyotl se encuentra en la zona centro de México (Figura 3), que es la zona  
320 que más RSU genera a nivel Nacional, era el municipio con mayor densidad poblacional  
321 en 2010, con 17,555.5 habitantes por km<sup>2</sup> (INEGI, 2011). En ese año se recolectaban  
322 820 t de RSU diariamente y su tasa de recolección per cápita era de 0.746 kg/hab/día.  
323 (SEMARNAT, 2013). Para 2016, la recolección diaria de RSU fue de 1200 t, con una  
324 tasa per cápita de 1.153 kg/hab/día (SEMARNAT, 2016). Aunque su tasa de recolección  
325 per cápita es menor a 2.0 kg, Netzahualcóyotl es uno de los municipios que mayor  
326 incremento en la recolección de RSU ha tenido de 2010 a 2016, su crecimiento es del  
327 46%, lo que excede la media de crecimiento nacional en este rubro. A nivel nacional,  
328 este municipio ocupa el décimo lugar en el incremento en la recolección de RSU, en la  
329 zona metropolitana del valle de México ocupa el tercer lugar. En el municipio existe un  
330 sitio de disposición final para RSU que recibe un promedio de 1,200,000 kg de RSU  
331 diariamente, ocupando el cuarto lugar en cuanto a cantidad de RSU recibidos a nivel  
332 nacional (INEGI, 2018).

333

#### **¿Cómo citar este artículo?**

Gómez-Maturano, J. (2020). Sustainable design of reverse supply chain for solid waste in Mexico. *Cuadernos de Administración*, 36(67), 31-47. <https://doi.org/10.25100/cdea.v36i67.8421>

334  
335

**Figura 3. Localización del caso de aplicación**



336  
337  
338

Fuente: Elaboración propia.

339 Cerca del 35% de los RSU en México son potencialmente valorizables, como el papel y  
340 cartón (13.8%), vidrio (5.9%), plásticos (10.9%), metales ferrosos (1.1%) y no ferrosos  
341 (0.6%), aluminio (1.7%) y textiles (1.4%). Sin embargo, de las 1200 t de RSU generadas  
342 diariamente se estima que sólo el 10% será reciclado mediante canales formales e  
343 informales (SEMARNAT, 2013), el resto, cerca de 1080 t/día pierden definitivamente su  
344 valor al ser depositados en basureros o rellenos sanitarios.

345  
346 El problema consiste en un diseño conceptual de CSI que permita recuperar los RSU  
347 valorizables de las fuentes de generación y los conduzca a los puntos de valorización  
348 industrial fuera del municipio, cubriendo en su operación con las tres dimensiones de  
349 la sostenibilidad. El alcance del diseño conceptual es una red de adquisición de RSU  
350 valorizables que recuperen los materiales de las distintas fuentes de generación y las  
351 conduzcan a los centros de transferencia para su posterior valorización industrial.

352  
353

#### **b. Identificación de necesidades**

354

355 Las necesidades de la CSI de RSU valorizables provienen de los entornos económico,  
356 medioambiental, social y del marco de leyes y reglamentos aplicables. De esta manera,  
357 para cada una de las tres funciones de las CSI-RSU se deben incluir las necesidades de  
358 las cuatro dimensiones, al menos en su entorno, tal como se muestra en la Figura 4.

359  
360

#### ***¿Cómo citar este artículo?***

Gómez-Maturano, J. (2020). Sustainable design of reverse supply chain for solid waste in Mexico. *Cuadernos de Administración*, 36(67), 31-47. <https://doi.org/10.25100/cdea.v36i67.8421>

**Figura 4.- Procedimiento de análisis funcional de CSI-RSU**



**Fuente:** Elaboración propia.

Las necesidades de diseño provienen de los atributos de sostenibilidad deseables para la CSI de RSU. Estos atributos son seguridad, salud y libertad de acción en la dimensión social, de coexistencia, conservación, estabilidad y protección en la dimensión medioambiental y de eficiencia, productividad y resiliencia en la dimensión económica. El cumplimiento con el marco normativo nacional, estatal y municipal también se vuelve una necesidad de diseño.

Por todo esto, el problema de diseño consiste en la modelación de una red de adquisición de RSU valorizables que permita recolectar la mayor cantidad de residuos en las diversas fuentes de generación; además, esta red debe suministrar a la industria de valorización de RSU en la cantidad, calidad y frecuencia demandada; todo ello minimizando los impactos que las operaciones de adquisición generan en los entornos social, económico y medioambiental.

#### 4.2. Etapa II. Análisis de viabilidad y funcional del sistema

##### a. Análisis de viabilidad

Las principales fuentes de generación de RSU en la Ciudad de México son las casas habitación (con el 48% de la generación), las unidades económicas como mercados, comercios y servicios (con el 37%) y otras fuentes de generación como las plazas públicas, avenidas y calles (15%) (SEDEMA, 2017). La Tabla 1 muestra las principales fuentes de generación en el área de estudio.

**Tabla 1. Fuentes de generación de RSU en Netzahualcóyotl**

Fuente	% de RSU	Generación diaria [t/día]	Generación per cápita
Casas Habitación	48	576 t/día	2.05 kg/ día/Vivienda
Unidades Económicas	37	444 t/día	9.095 kg/ día/Vivienda

Fuente: Elaboración propia a partir de INEGI (2017), INEGI (2016) e INEGI (2011).

**¿Cómo citar este artículo?**

## Versión evaluada

396 De estas fuentes de generación se obtienen los materiales valorizables de los RSU, que  
397 son aquellos que por sus características tienen las posibilidades técnicas, económicas  
398 y medioambientales de ser reincorporados a un proceso o tratamiento para permitir su  
399 valorización (SEDEMA, 2015). Los materiales más comunes que se pueden valorizar se  
400 muestran en la Tabla 2. Además, se muestra la presencia de estos materiales en los  
401 RSU y la generación estimada en el municipio de Netzahualcóyotl.  
402

<b>Tabla 2. Materiales valorizables de los RSU</b>			
<b>Materiales</b>	<b>Presencia en RSU</b>	<b>Generación diaria [t/día]</b>	<b>Aprovechamientos como:</b>
Papel y Cartón	13.8 %	165.6 t/día	Pulpa de papel y cartón.
Plástico	10.9 %	130.8 t/día	Aglomerados, Pellets, Hojuelas
Vidrio	5.9%	70.8 t/día	Vidrio.
Metales	3.4%	40.8 t/día	Productos metálicos.

**Fuente:** Elaboración propia a partir de INEGI (2018), SEMARNAT (2013) y NADF-024-AMB, 2013).

403  
404 Los puntos de adquisición de materiales valorizables de los RSU son los Centros de  
405 Acopio [CA] privados establecidos en el municipio. Según datos del Directorio Nacional  
406 de Unidades Económicas en Netzahualcóyotl hay 281 Unidades económicas orientadas  
407 a la comercialización de algún tipo de residuo, las cuales se concentran en el ramo  
408 43431 del sistema de clasificación industrial de América del Norte (INEGI, 2016). Estas  
409 unidades económicas dedicadas principalmente al comercio al por mayor especializado  
410 de materiales de desecho para reciclaje, como metal, papel, cartón, vidrio, plástico. El  
411 giro de los CA es: 145 comercializan residuos metálicos, 68 residuos de papel y cartón,  
412 60 residuos de plástico y 8 comercializa otros residuos. El vidrio es un material de los  
413 RSU que no se comercializa en el municipio.

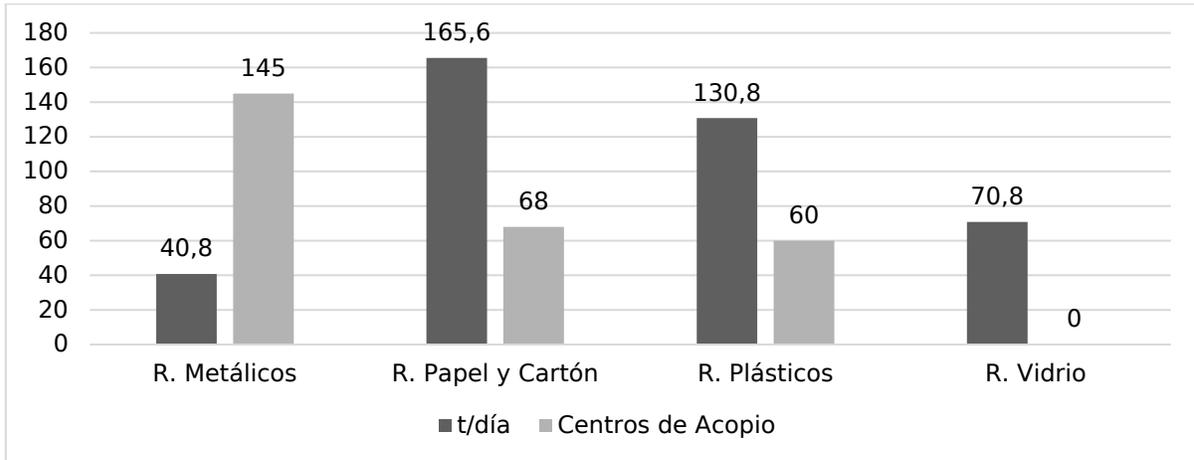
414  
415 A partir de los datos mostrados en la Gráfica 1 puede establecerse que el mercado para  
416 la comercialización de RSU valorizables es atractivo para los CA establecidos en el  
417 municipio: cada CA de residuos metálicos tiene un potencial de captación de 281 kg  
418 diarios de residuos; los CA de papel y cartón pueden acopiar hasta 2435 kg diarios cada  
419 uno; los CA de plásticos pueden captar hasta 2180 kg por día. Se destaca que 70 t de  
420 vidrio se está desperdiciando diariamente por no disponer de una CSI. Estos datos  
421 muestran la viabilidad de las redes de adquisición de RSU valorizables.  
422

### **¿Cómo citar este artículo?**

Gómez-Maturano, J. (2020). Sustainable design of reverse supply chain for solid waste in Mexico. *Cuadernos de Administración*, 36(67), 31-47. <https://doi.org/10.25100/cdea.v36i67.8421>

423  
424

**Gráfica 1. Cantidad de RSU valorizables y CA**



**Fuente:** Elaboración propia a partir de INEGI (2017) e INEGI (2016).

425  
426  
427  
428  
429

**d. Análisis funcional**

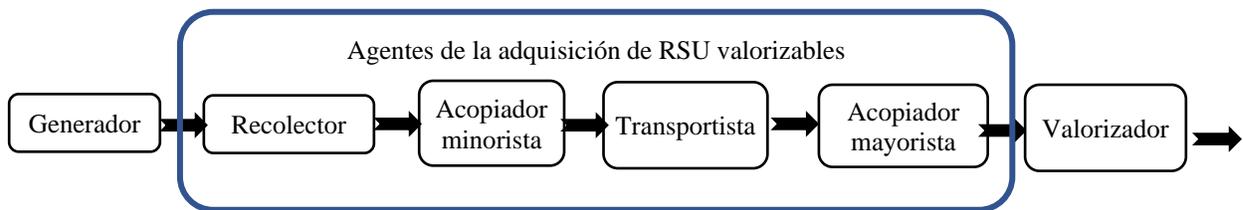
430  
431  
432  
433  
434  
435

El análisis funcional se realiza mediante la desagregación funcional de CSI en operaciones más específicas desarrolladas por agentes particulares. Los agentes involucrados en las funciones de la CSI se muestran en la **Figura 5**. A través de la desagregación funcional se identifican necesidades operativas de los agentes involucrados.

436

**Figura 5. Agentes identificados en CSI de RSU valorizables**

437  
438  
439  
440  
441  
442  
443  
444



445  
446

**Fuente:** Elaboración propia.

447  
448

**4.3. Etapa III. Requerimientos operativos y síntesis del sistema**

449  
450  
451  
452

En esta etapa se describen los requisitos operativos anticipados del sistema. Se traducen las expectativas de los agentes y *stakeholders* en requerimiento de carácter técnico operativo sobre el funcionamiento de la CSI.

**¿Cómo citar este artículo?**

Gómez-Maturano, J. (2020). Sustainable design of reverse supply chain for solid waste in Mexico. *Cuadernos de Administración*, 36(67), 31-47. <https://doi.org/10.25100/cdea.v36i67.8421>

453 **e. Requerimientos operativos**

454

455 Los requerimientos operativos se derivan del análisis de necesidades y funciones, tanto  
 456 internas, requeridas para el funcionamiento y efectividad del sistema, como externas,  
 457 para la interacción sostenida con los entornos medioambiental, social y económico. Los  
 458 requerimientos operativos internos se derivan de los agentes involucrados en la CSI,  
 459 mientras que los requerimientos externos provienen de los *stakeholders*.

460

461

<b>Tabla 3. Necesidades funcionales de los agentes de la CSI</b>	
<b>Agente</b>	<b>Necesidad</b>
Generador	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Que se recolecten sus RSU con la mayor frecuencia</li> <li>• Pagar el menor costo por la recolección de sus RSU.</li> </ul>
Adquisidor	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Adquirir la mayor cantidad de RSU valorizables de los generadores.</li> <li>• Obtener el máximo de dadas de los generadores.</li> <li>• Aprovechar al máximo las subvenciones por la colecta de RSU.</li> <li>• Suministrar la mayor cantidad RSU a la industria de la valorización.</li> <li>• Obtener el máximo precio de venta de los RSU adquiridos.</li> <li>• Operar al menor costo posible</li> </ul>
Valorizador	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Asegurar un suministro confiable del adquisidor (máxima cantidad, calidad y regularidad).</li> <li>• Suministrarse de RSU al menor costo.</li> <li>• Operar al menor costo.</li> <li>• Aprovechar las subvenciones directas y los estímulos fiscales derivados de la naturaleza de su actividad.</li> </ul>
<b>Fuente:</b> Elaboración propia.	

462

463 El análisis de requerimientos externos para que una CSI sea sostenible debe considerar  
 464 las necesidades de los *stakeholders* del sistema. Los *stakeholders*, son cualquier  
 465 persona o entidad que es afectada o concernida por las actividades de la CSI. Incluir  
 466 estas necesidades permite asegurar la funcionalidad de la CSI en su relación con los  
 467 entornos económico, social y medioambiental. En esta etapa se identifica a los  
 468 *stakeholders*; a sus necesidades, intereses y expectativas; balancear, reconciliar y  
 469 sintetizar esos aspectos; integrar las necesidades de estos con las estrategias de la CSI;  
 470 identificar la importancia de cada uno: poder, influencia, interés. La identificación de  
 471 los *stakeholders* se muestra en la Tabla 4.

472

**¿Cómo citar este artículo?**

Gómez-Maturano, J. (2020). Sustainable design of reverse supply chain for solid waste in Mexico. *Cuadernos de Administración*, 36(67), 31-47. <https://doi.org/10.25100/cdea.v36i67.8421>

<b>Tabla 4. Stakeholders identificados en CSI de RSU valorizables</b>	
<b>Dimensión</b>	<b>Stakeholders</b>
<b>Social</b>	Trabajadores de los agentes de la CSI. Comunidad Local Sociedad en su conjunto
<b>Económico</b>	Otros agentes de la CSI-RSU o de otras CSI. Unidades económicas locales. Economía Nacional
<b>Medioambiental</b>	Autoridades Municipales, Estatales y
<b>Marco Normativo</b>	Nacionales
Fuente: Elaboración propia.	

473  
474  
475  
476  
477  
478  
479  
480  
481

**f. Síntesis del sistema**

La síntesis del diseño conceptual del sistema se plasma a través de un conjunto de indicadores de la operación de las CSI de RSU valorizables, que se desprenden de los requerimientos operativos planteados en el paso “e”. Para la dimensión social, el diseño se presenta en la Tabla 5 y 6 para la dimensión medioambiental y Tabla 7 para la dimensión económica.

<b>Tabla 5. Integración del diseño en la dimensión social</b>		
<b>Dimensión social</b>		
<b>Requerimiento</b>	<b>Definición operativa</b>	<b>Indicadores</b>
<b>Salud</b>	Los riesgos para la salud en el lugar de trabajo, incluidos el calor, el ruido, el polvo, los productos químicos peligrosos, las máquinas inseguras y el estrés psicosocial que provocan enfermedades ocupacionales y pueden afectar a la comunidad local.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Listas de beneficios sociales provistos a los trabajadores.</li> <li>• Listas de servicios de salud provistos a los trabajadores.</li> <li>• Conciencia sobre temas de salud.</li> <li>• Riesgos de salud en el lugar de trabajo.</li> <li>• Riesgos de salud para la comunidad local derivados de las operaciones de la CSI.</li> </ul>
<b>Libertad de acción</b>	Cada persona puede dedicarse a la actividad lícita que desee, sin que nadie le pueda imponer forma alguna de trabajo, ni condiciones distintas a las previstas por el derecho.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Trabajo forzado.</li> </ul>
<b>Seguridad (e higiene)</b>	Prevención de riesgos laborales a través de la aplicación de medidas y el desarrollo de las actividades necesarias para la	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Conciencia sobre temas de seguridad.</li> <li>• Conocimiento de los pasos / protocolos a seguir en caso de emergencia y accidentes.</li> </ul>

**¿Cómo citar este artículo?**

## Versión evaluada

	prevención de riesgos derivados del trabajo.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Porcentaje de accidentes / lesiones en la organización.</li> <li>• Uso de equipo de protección.</li> </ul>
Fuente: Elaboración propia.		

482  
483  
484  
485  
486  
487  
488  
489  
490  
491  
492

En la literatura se encontraron dieciocho atributos de sustentabilidad, que incluyen indicadores muy generales y de difícil aplicación a sistemas productivos particulares. En el presente trabajo sólo se toman como requerimientos nueve de estos atributos de sustentabilidad, los cuales se definen en las Tablas 5, 6 y 7. La razón principal para no incluir más requerimientos de sustentabilidad obedece a las condiciones de marginalidad e informalidad en que operan los agentes de la CSI de RSU en la zona de estudio. Sólo el 1% de los CA identificados se encuentra en el Registro Federal de Contribuyentes, las operaciones de estos centros son informales lo que limita su análisis económico.

<b>Tabla 6. Integración del diseño en la dimensión Medioambiental</b>		
<b>Dimensión Medioambiental</b>		
<b>Requerimiento</b>	<b>Definición operativa</b>	<b>Indicadores</b>
<b>Existencia</b>	Garantizar la existencia de recursos naturales y de condiciones medioambientales favorables para las generaciones futuras.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Huella de Carbono (<i>Carbon Footprint</i>).</li> <li>• Huella Hídrica (<i>Water Footprint</i>).</li> <li>• Consumo de Energía (<i>Power consumption</i>).</li> <li>• Consumo de materias primas vírgenes.</li> <li>• Superficie pública requerida [m2]/ superficie disponible/usuarios del espacio público.</li> </ul>
<b>Estabilidad</b>	Se refiere al equilibrio ecológico y la relación armónica entre el hombre y los seres vivos con su medio ambiente.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La proporción de residuos sólidos urbanos que se deposita en rellenos sanitarios o controlados</li> <li>• Toneladas de residuos valorizados/toneladas de residuos generados.</li> <li>• Calidad del aire y ozono estratosférico en el último año.</li> </ul>
<b>Conservación y Protección</b>	Se refiere a las distintas maneras que existen para regular, minimizar o impedir el daño que las actividades de índole industrial, agrícola, urbana, comercial o de otro tipo ocasionan a los	<ul style="list-style-type: none"> <li>• % de suelos rurales perdidos al año para uso habitacional o industrial.</li> <li>• Volumen de residuos sólidos generados al año.</li> <li>• Tasa de crecimiento poblacional al año</li> <li>• Adopción de medidas para el consumo responsable de recursos naturales.</li> <li>• Número de leyes de protección aprobadas a nivel municipal, estatal y nacional.</li> </ul>

### ¿Cómo citar este artículo?

Gómez-Maturano, J. (2020). Sustainable design of reverse supply chain for solid waste in Mexico. *Cuadernos de Administración*, 36(67), 31-47. <https://doi.org/10.25100/cdea.v36i67.8421>

## Versión evaluada

	ecosistemas naturales.	• Número de asociaciones protectoras del medioambiente establecidas en el territorio.
Fuente: Elaboración propia.		

493 Para elegir los indicadores apropiados para las operaciones de adquisición es necesario  
494 apoyarse en la observación de sistemas reales en operación o bien en la consulta a  
495 expertos a través de técnicas participativas. El alcance de este trabajo se limita a la  
496 estructuración de los indicadores en requerimientos y dimensiones, sin tener  
497 mediciones concretas para valorar el desempeño del diseño propuesto.

498  
499

<b>Tabla 7. Integración del diseño en la dimensión Medioambiental</b>		
<b>Dimensión Económica</b>		
<b>Requerimiento</b>	<b>Definición operativa</b>	<b>Indicadores</b>
<b>Productividad</b>	Entendemos por productividad el resultado que obtenemos de un proceso relacionado con los recursos empleados y el esfuerzo que ello supone.	<ul style="list-style-type: none"><li>• <i>Return on Assets</i>.</li><li>• ROE (<i>return on equity</i>).</li><li>• Rotación de inventarios.</li></ul>
<b>Eficiencia</b>	Supone la valorización de la mayor cantidad de RSU al menor costo posible.	<ul style="list-style-type: none"><li>• Ingresos/costos.</li><li>• RSU valorizados [t]/ RSU recolectados [t].</li></ul>
<b>Viabilidad</b>	Probabilidad que existe de llevar aquello que se pretende o planea llevar a cabo, de concretarlo efectivamente.	<ul style="list-style-type: none"><li>• Flujo de efectivo</li><li>• Estructura de costos</li><li>• Reducción en el gasto público para la gestión de residuos.</li></ul>
Fuente: Elaboración propia.		

500  
501  
502  
503  
504  
505  
506  
507  
508  
509  
510  
511

### **Etapa IV. Integración y validación del diseño**

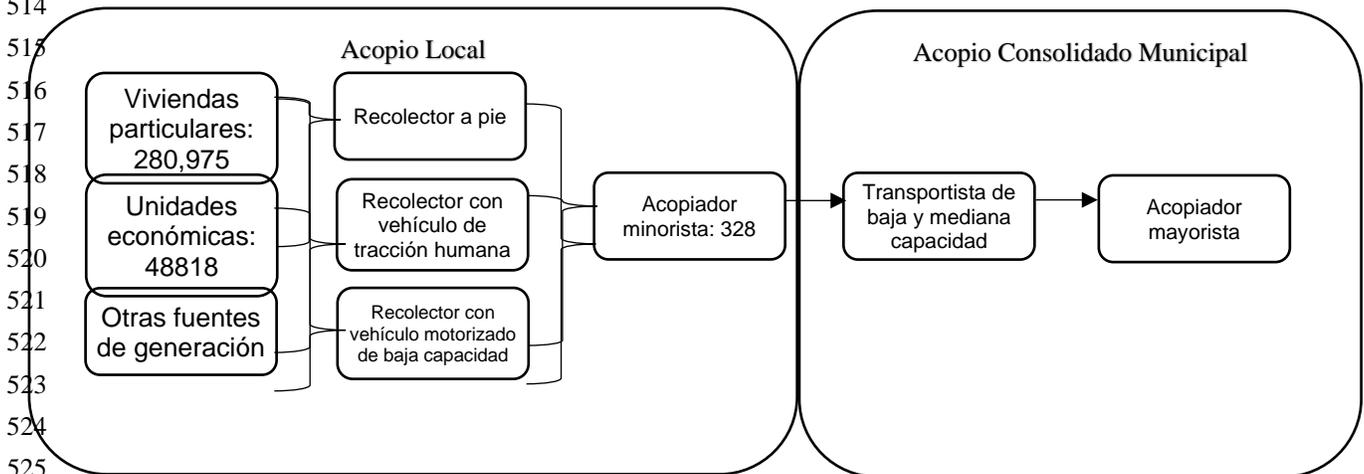
#### **g. Integración del diseño**

La red de adquisición para la CSI de RSU valorizables debe operar en dos fases, tal como se muestra en la Figura 6: una de acopio local y otra de acopio consolidado que opera a nivel municipal. La primera fase se caracteriza por el movimiento de residuos en distancias cortas mediante recolección a pie, en vehículos de tracción humana y animal e incluso vehículos motorizados de baja capacidad (hasta 1 t).

#### **¿Cómo citar este artículo?**

Gómez-Maturano, J. (2020). Sustainable design of reverse supply chain for solid waste in Mexico. *Cuadernos de Administración*, 36(67), 31-47. <https://doi.org/10.25100/cdea.v36i67.8421>

**Figura 6. Diseño conceptual de la CSI para RSU en el municipio de Netzahualcóyotl, México**



**Fuente:** Elaboración propia.

La red que hace posible la primera fase inicia con los generadores que pueden producir hasta 420 t de materiales valorizables al día. Cada AGEB produce 2.4 t/ día de materiales valorizables, lo que demanda cuadrillas de alrededor de 20 recolectores: un acopio de 100 kg a 150 kg por día hace rentable la actividad de estos recolectores. Los Mapas 1 y 2 muestran los centroides de cada AGEB, coloreados en morado, los cuales constituyen los primeros nodos de la red de adquisición diseñada.

Cada acopiador minorista, mostrado en rojo en los Mapas 1 y 2, cuenta en promedio con una superficie de acopio de 100 m<sup>2</sup> puede recibir hasta 1.4 t de materiales valorizables diariamente. Los 281 CA identificados no pueden cubrir la oferta de RSU, por lo que se requieren al menos 47 CA más para cubrir los AGEB faltantes. Cada CA demanda centra de tres trabajadores. Para mover los materiales valorizables generados en cada AGEB se requieren vehículos de baja capacidad (hasta 3.5 t), un viaje diario de uno de estos vehículos es suficiente para mover el residuo acopiado en cada AGEB.

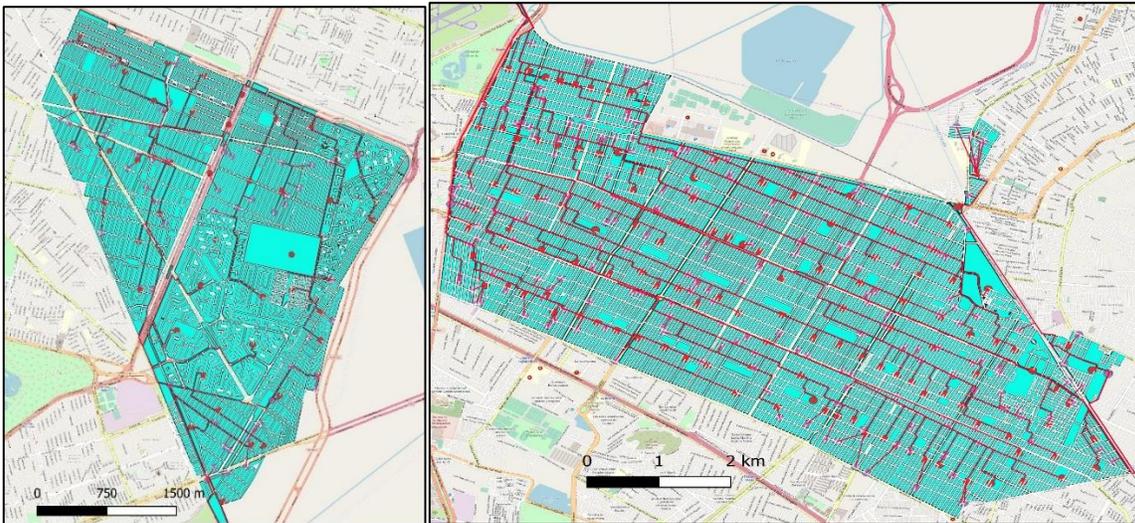
Sin plantear un problema de ruteo para esta red, lo cual sale del alcance del trabajo, un vehículo de baja capacidad puede hacer hasta 6 viajes por día, por lo que una flota de 30 transportistas es suficiente. Además del operador, cada unidad requiere de un auxiliar para la carga y descarga de materiales. Para consolidar los materiales y transferir la carga a vehículos de mediana capacidad (3.5 a 7.5 t) se requieren de tres centros de transferencia: uno para plástico, uno para papel y cartón, y uno más para metales y otros residuos de manejo especial. La configuración de esta red genera alrededor de 8000 empleos.

La segunda fase recorre distancias medias y ocupa vehículos motorizados de baja (hasta 3.5 t) y mediana capacidad (más de 3.5 y hasta 7.5 t). La fase de acopio local debe ser

**¿Cómo citar este artículo?**

## Versión evaluada

555 la más ágil para reducir las afectaciones a la población circundante, mientras que la  
556 segunda fase debe ser eficiente para abatir los costos del almacenamiento y transporte  
557 a gran escala. En los Mapas 1 y 2 se muestra la red de adquisición para el acopio local,  
558 esta red constituye la CSI para recuperar los RSU valorizables en el municipio. El Mapa  
559 1 muestra la zona norte del municipio de Netzahualcóyotl y en el Mapa 2 se muestra la  
560 zona oriente del municipio. Los puntos rojos representan los centroides de las fuentes  
561 de generación de RSU, el centroide del AGEB, que son los puntos donde inicia la CSI.  
562 Estos puntos están conectados mediante la infraestructura vial del municipio con los  
563 CA minoristas. Los CA minoristas están coloreados de violeta. Las vialidades en rojo  
564 representan las rutas para el tráfico de residuos en el municipio.  
565



566

**Mapa 1.-** Configuración de CSI en la zona norte de Netzahualcóyotl.

**Mapa 2.-** Configuración de CSI en la zona oriente de Netzahualcóyotl.

Fuente: Elaboración propia *software QGIS*

567

568

569

### **h. Prueba y evaluación del sistema (validación)**

570

571

572

573

574

575

576

577

578

579

580

581

Una validación del sistema conceptual incluye (Landry, Malouin, y Oral, 1983): la identificación de *stakeholders*; la formulación de los objetivos del sistema; la determinación de los factores críticos; la confianza en el modelo y; los elementos de costo. Para el presente diseño conceptual se proponen tres técnicas participativas ocupadas por Hanington y Martin (2012): Indagación contextual para la identificación de *stakeholders* e identificación de factores críticos. *Brainstorm*, con organizadores gráficos para la formulación de los objetivos del sistema.

De manera realista, una evaluación completa del sistema, en términos de cumplir con los requisitos de consumo especificados inicialmente, no se puede lograr hasta que el sistema se produzca y entre en operación. Por ello una extensión de la investigación es la prueba del sistema en campo.

### **¿Cómo citar este artículo?**

Gómez-Maturano, J. (2020). Sustainable design of reverse supply chain for solid waste in Mexico. *Cuadernos de Administración*, 36(67), 31-47. <https://doi.org/10.25100/cdea.v36i67.8421>

582 Un diseño de CSI como el que se propone en este trabajo puede reducir el volumen de  
583 RSU que se conduce a disposición final en un 30%, incrementando la tasa de adquisición  
584 de materiales valorizables en los RSU. A partir de las cifras presentadas,  
585 particularmente en la sección de análisis de viabilidad, se mostró que cerca de 240 t de  
586 materiales valorizables se desperdician por no contar con un sistema de adquisición.  
587 Esto implica la reducción de 32 camiones recolectores de RSU (cada camión con  
588 capacidad de 7.5 t) en el municipio, o que reduce los costos de gestión de residuos y de  
589 las emisiones de CO<sub>2</sub>. La localización de CA minoristas en los centroides de cada AGEB  
590 reduce las distancias de recolección estableciendo flujos de RSU más ágiles que  
591 reducen el impacto del manejo de los materiales valorizables. Además, concentra el  
592 flujo de materiales en ciertas vialidades del municipio, reduciendo el impacto al entorno  
593 social por contaminación del paisaje urbano.

594

## 595 **5. Conclusiones**

596

597 El problema de la recuperación de los RSU del flujo convencional de la cuna a la tumba,  
598 característico de la CS tradicional, constituye una piedra angular para la disrupción  
599 entre linealidad y circularidad de los modelos productivos en un marco de desarrollo  
600 sostenible. Las CSI que permiten la recuperación de RSU para su valorización  
601 constituyen un tipo de CS con fuertes implicaciones sociales y ambientales. Estas  
602 implicaciones plantean un conjunto de problemas particulares de las CSI de RSU que  
603 van más allá de la eficiencia operativa y la rentabilidad.

604

605 La propuesta presentada en este trabajo enriquece la discusión sobre la sostenibilidad  
606 de la CS tradicional y la necesidad de ampliar sus funciones y alcances, particularmente  
607 en lo tocante a su responsabilidad compartida en la generación de residuos  
608 posconsumo. La desagregación funcional de los flujos directos e inversos de la CS,  
609 realizada gracias a la aplicación del enfoque de sistemas, muestra la variedad requerida  
610 para la implementación de modelos de economía circular y la necesidad de ampliar las  
611 herramientas de diseño. El Procedimiento de Ingeniería de Sistemas puede constituir  
612 una herramienta útil para los gestores y agentes de la CSI en su afán por contribuir al  
613 desarrollo sostenible y a la reducción de RSU.

614

615 El diseño de CSI obtenido puede reducir el volumen de RSU que se conduce a  
616 disposición final en un 30%, generando alrededor de ocho mil empleos directos,  
617 estableciendo flujos de RSU más ágiles que reducen el impacto del manejo de estos  
618 materiales en la zona y estimulando modelos de economía circular para los residuos  
619 metálicos, plásticos, papel y cartón, e incluso vidrio.

620

621 Es una limitante de este trabajo sólo presentar el diseño conceptual, que constituye uno  
622 de los varios diseños posibles para una CSI de RSU valorizables. Será una extensión del  
623 trabajo poner a prueba el diseño, mediante un estudio de factibilidad más minucioso,  
624 que constituye la etapa posterior al PIS.

625

### ***¿Cómo citar este artículo?***

Gómez-Maturano, J. (2020). Sustainable design of reverse supply chain for solid waste in Mexico.  
*Cuadernos de Administración*, 36(67), 31-47. <https://doi.org/10.25100/cdea.v36i67.8421>

626 **6. Agradecimientos**

627

628 Se extiende un profundo agradecimiento a la Universidad Nacional Autónoma de  
629 México, particularmente a la Comunidad de Cadena de Suministro y Logística del  
630 posgrado de Ingeniería de Sistemas de la Facultad de Ingeniería. Muy en especial al  
631 *Manager* del proyecto, Dr. Benito Sánchez Lara.

632

633 **7. Conflicto de intereses**

634

635 El autor declara no tener ningún conflicto de intereses.

636

637 **8. Fuente de financiamiento**

638

639 Este artículo se deriva de la investigación titulada “Modelación de un sistema de  
640 logística inversa para la gestión sostenible de residuos sólidos urbanos en la Ciudad  
641 de México”, financiada por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, México, en el  
642 período enero de 2017 a diciembre de 2020.

643

644 **9. Referencias**

645

646 Abdala, E. C., & Barbieri, J. C. (2014). Determinants of Sustainable Supply Chain: an analysis of  
647 mensuration models of pressures and socio-environmental practices. *Journal of Operations and*  
648 *Supply Chain Management*, 7(2), 110-123. <https://doi.org/10.12660/joscmv7n2p110-123>

649

650 Agrawal, S., Singh, R. K., & Murtaza, Q. (2015). A literature review and perspectives in reverse  
651 logistics. *Resources, Conservation and Recycling*, 97, 76-92.  
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.02.009>.

652

653 Baumgartner, R. J. (2011). Critical perspectives of sustainable development research and  
practice. *Journal of Cleaner Production*, 19(8). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.01.005>

654

655 Bendul, J. C., Rosca, E., & Pivovarova, D. (2017). Sustainable supply chain models for base of the  
656 pyramid. *Journal of Cleaner Production*, 162, S107-S120.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.001>.

657

658 Banco Mundial (BM). (2016). *Basura Cero-Los residuos sólidos en el epicentro del Desarrollo*  
659 *Sostenible*. Recuperado de <https://www.bancomundial.org/es/news/feature/2016/03/03/waste-not-want-not---solid-waste-at-the-heart-of-sustainable-development>

660

661 Blanchard, B. S., & Blyler, J. E. (2016). *System engineering management* (5a ed.) New Jersey,  
USA: Wiley.

662

663 Bowersox, D. J., Closs, D. J., Cooper, M. B., y Martínez Suárez, N. N. (2007). *Administración y*  
*logística en la cadena de suministros*. México. McGraw-Hill Interamericana.

664

665 Chopra, S., y Meindl, P. (2013). *Administración de la cadena de suministro* (5ª ed.). Naucalpan  
de Juárez, México Pearson educación.

**¿Cómo citar este artículo?**

Gómez-Maturano, J. (2020). Sustainable design of reverse supply chain for solid waste in Mexico. *Cuadernos de Administración*, 36(67), 31-47. <https://doi.org/10.25100/cdea.v36i67.8421>

## Versión evaluada

- 666 Ellen MacArthur Foundation, M. y C. (2016). *Hacia una Economía Circular*. Recuperado de  
667 [https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/Executive\\_summar](https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/Executive_summar_y_SP.pdf)  
668 [y\\_SP.pdf](https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/Executive_summar_y_SP.pdf)
- 669 Gómez Maturano, J. (2018). Las cadenas de suministro y el desarrollo sostenible: una revisión de  
670 la literatura. *Revista Universitaria Ruta*, 20(II), 37-56. Recuperado de  
671 <https://revistas.userena.cl/index.php/ruta/article/view/1089>
- 672 Govindan, K., Soleimani, H., & Kannan, D. (2015). Reverse logistics and closed-loop supply chain:  
673 A comprehensive review to explore the future. *European Journal of Operational Research*,  
674 240(3), 603-626. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.07.012>
- 675 GRI. (2015). *Sustainability and Reporting Trends in 2025 - Preparing for the Future*. Retrieved  
676 from [https://www.globalreporting.org/resourcelibrary/Sustainability-and-Reporting-Trends-in-](https://www.globalreporting.org/resourcelibrary/Sustainability-and-Reporting-Trends-in-2025-1.pdf)  
677 [2025-1.pdf](https://www.globalreporting.org/resourcelibrary/Sustainability-and-Reporting-Trends-in-2025-1.pdf)
- 678 Guide, V. D. R., Jayaraman, V., & Linton, J. D. (2003). Building contingency planning for closed-  
679 loop supply chains with product recovery. *Journal of Operations Management*, 21(3), 259-279.  
680 [https://doi.org/10.1016/S0272-6963\(02\)00110-9](https://doi.org/10.1016/S0272-6963(02)00110-9)
- 681 Gimenez, C., & Tachizawa, E. M. (2012). Extending sustainability to suppliers: a systematic  
682 literature review. *Supply Chain Management. An International Journal*, 17(5), 531-543.  
683 <https://doi.org/10.1108/13598541211258591>
- 684 Hanington, B., & Martin, B. (2012). *Universal methods of design: 100 ways to research complex*  
685 *problems, develop innovative ideas, and design effective solutions*. Massachusetts, USA:  
686 Rockport Publishers.
- 687 Hassini, E., Surti, C., & Searcy, C. (2012). A literature review and a case study of sustainable  
688 supply chains with a focus on metrics. *International Journal of Production Economics*, 140(1),  
689 69-82. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2012.01.042>
- 690 Horváth, I. (2004). On some Crucial Issues of Computer Support of Conceptual Design (pp. 123-  
691 142). In D., Talabă & T. Roche (Eds.), *Product Engineering*. Dordrecht, Holland: Springer.  
692 [https://doi.org/10.1007/1-4020-2933-0\\_9](https://doi.org/10.1007/1-4020-2933-0_9)
- 693 Ilgin, M. A., & Gupta, S. M. (2013). Reverse Logistics (p. 401). In S. M. Gupta (Ed.), *Reverse*  
694 *Supply Chains*. New York, USA: Taylor y Francis Group.
- 695 INEGI. (2010). *Marco geoestadístico nacional*. Recuperado de  
696 <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825292812>
- 697 INEGI. (2011). *Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Delegacionales 2011*. Recuperado de  
698 [https://www.inegi.org.mx/programas/cngmd/2011/default.html#Datos\\_abiertos](https://www.inegi.org.mx/programas/cngmd/2011/default.html#Datos_abiertos)
- 699 INEGI. (2013). *Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Delegacionales 2013*. Recuperado de  
700 [https://www.inegi.org.mx/programas/cngmd/2013/default.html#Datos\\_abiertos](https://www.inegi.org.mx/programas/cngmd/2013/default.html#Datos_abiertos)
- 701 INEGI. (2015). *Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Delegacionales 2015*. Recuperado de  
702 [https://www.inegi.org.mx/programas/cngmd/2015/default.html#Datos\\_abiertos](https://www.inegi.org.mx/programas/cngmd/2015/default.html#Datos_abiertos)
- 703 INEGI. (2016). *Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas*. Recuperado de  
704 <http://www.beta.inegi.org.mx/app/mapa/denue/>

### **¿Cómo citar este artículo?**

Gómez-Maturano, J. (2020). Sustainable design of reverse supply chain for solid waste in Mexico. *Cuadernos de Administración*, 36(67), 31-47. <https://doi.org/10.25100/cdea.v36i67.8421>

## Versión evaluada

- 705 INEGI. (2017). *Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Delegacionales 2017*. Recuperado de  
706 <https://www.inegi.org.mx/programas/cngmd/2017/default.html#Tabulados>.
- 707 INEGI. (2018). *Censo Nacional de Gobiernos Municipales y Delegacionales 2017: Marco*  
708 *Conceptual*. Recuperado de  
709 [http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod\\_serv/contenidos/espanol/b](http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod_serv/contenidos/espanol/b)  
710 [vinegi/productos/nueva\\_estruc/702825079536.pdf](http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod_serv/contenidos/espanol/b)
- 711 INEGI. (2019). *Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas, DENUE Interactivo*  
712 *04/2019*. Recuperado de  
713 [http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod\\_serv/contenidos/espanol/b](http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod_serv/contenidos/espanol/b)  
714 [vinegi/productos/nueva\\_estruc/702825109196.pdf](http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod_serv/contenidos/espanol/b)
- 715 Jiménez, J. E., y Hernández, S. (2002). Marco conceptual de la cadena de suministro: un nuevo  
716 enfoque logístico. *Instituto Mexicano del Transporte*, (215), 1-272. Retrieved from  
717 <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt215.pdf>
- 718 Kinobe, J. R., Gebresenbet, G., & Vinnerås, B. (2012). Reverse Logistics Related to Waste  
719 Management with Emphasis on Developing Countries—A Review Paper. *Journal of*  
720 *Environmental Science and Engineering B Formerly Part of Journal of Environmental Science*  
721 *and Engineering*, 1, 1104-1118. Retrieved from  
722 <https://196.43.140.182/handle/20.500.11951/204>.
- 723 KPMG. (2018). *Desarrollo sostenible en México*. Recuperado de  
724 <http://www.pactomundial.org.mx/site/wp-content/uploads/2018/03/KPMG-Estudio-Desarrollo->  
725 [Sostenible-en-Mexico2018.pdf](http://www.pactomundial.org.mx/site/wp-content/uploads/2018/03/KPMG-Estudio-Desarrollo-)
- 726 Lacy, P., & Rutqvist, J. (2015). *Waste to wealth: the circular economy advantage*. London, UK:  
727 Palgrave Macmillan.
- 728 Landry, M., Malouin, J.-L., & Oral, M. (1983). Model validation in operations research. *European*  
729 *Journal of Operational Research*, 14(3), 207-220. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(83\)90257-](https://doi.org/10.1016/0377-2217(83)90257-6)  
730 [6](https://doi.org/10.1016/0377-2217(83)90257-6)
- 731 Miser, H. J. (1993). A foundational concept of science appropriate for validation in operational  
732 research. *European Journal of Operational Research*, 66(2), 204-215.  
733 [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(93\)90313-C](https://doi.org/10.1016/0377-2217(93)90313-C)
- 734 Nakashima, K., & Gupta, S. M. (2013). Modeling Supplier Selection in Reverse Supply Chains (p.  
735 401). In S. M. Gupta (Ed.), *Reverse Supply Chain: Issues and analysis*. New York, USA: Taylor  
736 & Francis Group.
- 737 UNEP. (2015). Perspectiva mundial de la gestión de residuos Resumen para los responsables de  
738 la toma de decisiones Perspectiva mundial de la gestión de residuos. *Unesco*, 1(1), 1-5.  
739 Recuperado de  
740 [https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/7728/GEO4\\_Summary\\_Spanish.pdf?s](https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/7728/GEO4_Summary_Spanish.pdf?sequence=4&isAllowed=y)  
741 [equence=4&isAllowed=y](https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/7728/GEO4_Summary_Spanish.pdf?sequence=4&isAllowed=y)
- 742 Rajeev, A., Pati, R. K., Padhi, S. S., & Govindan, K. (2017). Evolution of sustainability in supply  
743 chain management: A literature review. *Journal of Cleaner Production*, 162, 299-314.  
744 <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.05.026>

### ¿Cómo citar este artículo?

Gómez-Maturano, J. (2020). Sustainable design of reverse supply chain for solid waste in Mexico. *Cuadernos de Administración*, 36(67), 31-47. <https://doi.org/10.25100/cdea.v36i67.8421>

## Versión evaluada

- 745 Schaltegger, S., & Burritt, R. (2014). Measuring and managing sustainability performance of  
746 supply chains. *Supply Chain Management: An International Journal*, 19(3), 232-241.  
747 <https://doi.org/10.1108/SCM-02-2014-0061>
- 748 Secretaría de Medio Ambiente. (2015, julio). Norma Ambiental para el Distrito Federal NADF-  
749 024-AMBT-2013, que establece los criterios y especificaciones técnicas bajo los cuales se  
750 deberá realizar la separación, clasificación, recolección selectiva y almacenamiento de los  
751 residuos del distrito federal que establece los criterios y especificaciones técnicas bajo las  
752 cuales se deberá realizar la separación, clasificación, recolección selectiva y almacenamiento  
753 de los residuos del Distrito Federal. *Gaceta Oficial*, 22-43. Recuperado de  
754 <http://data.sedema.cdmx.gob.mx/nadf24/images/infografias/NADF-024-AMBT-2013.pdf>
- 755 Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2013). *Informe de la Situación del Medio*  
756 *Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales. Indicadores Clave y de*  
757 *Desempeño Ambiental*. Ciudad de México, México. Recuperado de  
758 <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2013/CD001623.pdf>
- 759 Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2016). *Informe de la Situación del Medio*  
760 *Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales. Indicadores Clave, de*  
761 *Desempeño Ambiental y de Crecimiento Verde*. México. Ciudad de México, México.  
762 Recuperado de  
763 [https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/tema/pdf/Informe15\\_completo.pdf](https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/tema/pdf/Informe15_completo.pdf)
- 764 SEDEMA. (2017). *Inventario de Residuos Sólidos*. Recuperado de  
765 [http://www.caepccm.df.gob.mx/doctos/transparencia2012/art15fracIX/IAT\\_TRIM\\_2\\_2014.pdf](http://www.caepccm.df.gob.mx/doctos/transparencia2012/art15fracIX/IAT_TRIM_2_2014.pdf)
- 766 Seuring, S. (2013). A review of modeling approaches for sustainable supply chain management.  
767 *Decision support systems*, 54(4), 1513-1520. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2012.05.053>
- 768 Varsei, M., Soosay, C., Fahimnia, B., & Sarkis, J. (2014). Framing sustainability performance of  
769 supply chains with multidimensional indicators. *Supply Chain Management: An International*  
770 *Journal*, 19(3), 242-257. <https://doi.org/10.1108/SCM-12-2013-0436>
- 771 Veleva, V., & Bodkin, G. (2018). Corporate-entrepreneur collaborations to advance a circular  
772 economy. *Journal of Cleaner Production*, 188, 20-37.  
773 <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.196>
- 774 Winter, M., & Knemeyer, A. M. (2013). Exploring the integration of sustainability and supply chain  
775 management. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 43(1), 18-38.  
776 <https://doi.org/10.1108/09600031311293237>

### ¿Cómo citar este artículo?

Gómez-Maturano, J. (2020). Sustainable design of reverse supply chain for solid waste in Mexico. *Cuadernos de Administración*, 36(67), 31-47. <https://doi.org/10.25100/cdea.v36i67.8421>