



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**PLANIFICACIÓN ESTRATÉGICA PARA EL MANEJO DE
RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS CONSIDERANDO A
LAS DIFERENTES PARTES INTERESADAS**

TESIS presentada por:

ALICIA DANAE DÍAZ BARRIGA FERNÁNDEZ

**A la División de Estudios de Posgrado de la
Facultad de Ingeniería Química como
requisito parcial para obtener el
grado de:**

**MAESTRA EN CIENCIAS EN
INGENIERÍA QUÍMICA**

Morelia, Mich.

Febrero 2018

RESUMEN

PLANIFICACIÓN ESTRATÉGICA PARA EL MANEJO DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS CONSIDERANDO A LAS DIFERENTES PARTES INTERESADAS

Por

Alicia Danae Díaz Barriga Fernández

Febrero 2018

Maestra en Ciencias en Ingeniería Química

Dirigida por: Dr. Fabricio Nápoles Rivera

Actualmente los residuos sólidos urbanos representan un gran problema alrededor del mundo. Especialmente en los países subdesarrollados donde no existe un apropiado sistema para el manejo de los residuos que tome en cuenta aspectos ambientales, sociales y los intereses de los diferentes organismos involucrados. Por lo que en este trabajo se presenta un nuevo enfoque de optimización para la planificación del sistema del manejo de residuos sólidos urbanos, el cual incluye reciclaje, transporte, separación y distribución de los residuos. En la primera parte del trabajo la aproximación propuesta toma en cuenta a los diferentes actores involucrados en el sistema propuesto y la formulación del modelo incluye un método multi-objetivo para maximizar el beneficio de las partes interesadas. Además, se generan los pesos de los diferentes usuarios mediante la técnica de muestreo *latin hypercube*, que proporciona una manera sistemática para la generación de los pesos usando una distribución normal. Un caso de estudio en México es presentado, donde tres escenarios fueron analizados. El primer escenario considera que los costos de separación son absorbidos por cada una de las empresas, el segundo escenario asume que el gobierno cubre los costos de separación y el tercer escenario toma como principal suposición que no hay costo de separación debido a que la separación se da en donde se produce la basura. Por otro lado, cuando hablamos de la composición de basura, ésta es influida por varios factores como el lugar donde se produce, las estaciones, el desarrollo económico de la gente que la produce, etc. De igual manera los precios de los productos cambian de acuerdo con la oferta y la

demanda. Por lo que en la segunda parte de este trabajo se tomó en cuenta la incertidumbre asociada a la disponibilidad de los residuos y a los precios de los productos, para la planificación del manejo de los RSU. Además tres casos son analizados, el optimista, promedio y pesimista con diferentes desviaciones estándar, para el mismo caso de estudio. La metodología propuesta en este trabajo proporciona información detallada para la toma de decisiones que involucre varias partes interesadas.

ÍNDICE

Lista de tablas	vii
Lista de figuras	viii
Nomenclatura	x
Agradecimientos.....	xv
Capítulo I. Introducción	1
1.1 Generalidades.....	1
1.2 Objetivos	3
1.2.1 Objetivo General.....	3
1.2.2. Objetivos Específicos.....	3
1.3 Justificación	4
1.4 Alcance	5
1.5 Hipótesis	5
Capítulo II. Marco Teórico	6
Capítulo III. Metodología	10
3.1 Casos de estudio	10
3.2 Planificación estratégica de sistemas para el manejo de los RSU considerando a las diferentes partes interesadas	13
3.2.1 Modelo matemático.....	16
3.2.1.1 Funciones objetivo.....	24
3.2.1.2 Formulación multi-stakeholder.....	25
3.2.1.3 Solución compromiso	26
3.2.1.4 Solución factible	26
3.3 Planificación estratégica de sistemas para el manejo de los RSU bajo incertidumbre, considerando a las diferentes partes interesadas	27
3.3.1 Modelo matemático.....	27
3.3.1.1 Funciones objetivo.....	34
3.3.1.2 Escenarios optimista, promedio y pesimista bajo incertidumbre	35
3.3.1.3 Solución compromiso total.....	37
Capítulo IV. Resultados.....	38
4.1 Resultados para la planificación estratégica de sistemas para el manejo de los RSU considerando a las diferentes partes interesadas	38

4.2 Resultados para la planificación estratégica de sistemas para el manejo de los RSU bajo incertidumbre, considerando a las diferentes partes interesadas	55
Capítulo V.Conclusiones	67
Bibliografía	69

Lista de tablas

Tabla	Página
3.1.1 Residuos generados por tipo y subtipo de residuos en cada ciudad y eficiencia de recolección de estos.....	10
3.1.2 Distancias desde las ciudades hasta las plantas de procesamiento y precios unitarios de transporte ^a	11
3.1.3 Costo unitario de separación por tipo de residuo.	11
4.1.1.1 Resultados para el escenario 1	39
4.1.2.1 Resultados para el escenario 2	45
4.1.3.1 Resultados para el escenario 3	51

Lista de figuras

Figura	Página
1.1.1 Generación de RSU millones de toneladas. Sedesol. México. 2013.....	1
1.1.2 Composición de los RSU por tipo de residuo. Sedesol. México. 2012.....	2
3.2.1 Planteamiento del problema.....	14
3.2.1.1 Superestructura propuesta para la cadena de suministros de los RSU.	17
4.1.1.1 Distribución de los productos obtenidos a partir de los RSU al maximizar el BENT en el escenario 1.	40
4.1.1.2 Distribuciones de los productos obtenidos a partir de los RSU al minimizar la SC en el escenario 1.....	41
4.1.1.3 Distribución de los productos obtenidos a partir de los RSU cuando se minimiza la SFP para el escenario 1.	42
4.1.1.4. Porcentaje para cada función objetivo lejos de su máximo individual para las tres estrategias de optimización en el primer escenario.....	43
4.1.2.1 Distribución de los productos obtenidos de los RSU al maximizar el BENT en el escenario 2.....	46
4.1.2.2 Distribución de los productos obtenidos de los RSU al minimizar la SC en el escenario 2.....	47
4.1.2.3 Distribución de los productos obtenidos de los RSU al minimizar la SFP en el escenario 2.....	48
4.1.2.4 Porcentaje para cada función objetivo lejos de su máximo individual para las tres estrategias de optimización en el segundo escenario.	49
4.1.3.1 Distribución de los productos obtenidos de los RSU al maximizar el BENT en el escenario 3.....	52

4.1.3.2 Distribución de los productos obtenidos de los RSU al minimizar la SC	53
4.1.3.3 Distribución de los productos obtenidos de los RSU al minimizar la SC	54
4.1.3.4 Distribución de los productos obtenidos de los RSU al minimizar la SC	55
4.2.1 Casos optimista, promedio y pesimista con diferentes desviaciones éstandar($\sigma=0.05, 0.1, 0.2$), cuando el BENT fue maximizado.....	56
4.2.2 Casos optimista, promedio y pesimista con diferentes desviaciones éstandar($\sigma=0.05, 0.1, 0.2$), cuando el porcentaje total de RSU reciclados fue maximizado.	59
4.2.3. Casos optimista, promedio y pesimista con diferentes desviaciones éstandar($\sigma=0.05, 0.1, 0.2$), cuando el beneficio económico neto del metal es maximizado.	60
4.2.4 Casos optimista, promedio y pesimista con diferentes desviaciones éstandar($\sigma=0.05, 0.1, 0.2$), cuando el beneficio económico neto del papel es maximizado.	61
4.2.5 Casos optimista, promedio y pesimista con diferentes desviaciones éstandar($\sigma=0.05, 0.1, 0.2$), cuando el beneficio económico neto de los orgánicos es maximizado.	62
4.2.6 Casos optimista, promedio y pesimista con diferentes desviaciones éstandar($\sigma=0.05, 0.1, 0.2$), cuando los gastos del gobierno son minimizados.....	63
4.2.7 Los resultados obtenidos para la solución compromiso total con una sigma de 0.1.	65
4.2.8. Porcentaje de disatisfacción para cada función objetivo cuando la SCT fue minimizada	66

Nomenclatura

Índices

wn	Índice para designar al tipo de residuo.
c	Índice para designar la ciudad determinada.
$pp - wn$	Índice para designar al tipo de industria.
$n - wn$	Índice para designar al tipo de tecnología.
obj	Índice para designar a la función objetivo.
e	Índice para designar a los escenarios.

Planificación estratégica de sistemas para el manejo de los RSU considerando a las diferentes partes interesadas

Parámetros

$C_{wn,pp-wn,n-wn}^{proces\ sin\ g}$	Costo unitario de procesamiento por tipo de residuo wn tratado con la tecnología $n-wn$.
$C_{wn,c}^{no-sep}$	Costo unitario por tratar la basura que no se recicla.
$C_{wn,w-wn,c}^{product}$	Costo unitario del tipo de producto $p-wn$.
$C_{wn,c}^{sep}$	Costo unitario de separación del tipo de residuo wn .
$C_{wn}^{unit-transp}$	Costo unitario de transporte de los residuos desde las ciudades a las plantas de procesamiento.
$C_{wn,n-wn}^{unit-transp-product}$	Costo unitario de transporte de los productos a las ciudades donde se consumirán.
$d_{c,pp-wn}$	Distancia entre la ciudad c y la planta de procesamiento $pp-wn$.
$F\ max_{wn,pp-wn,n-wn,q}^{proces\ sin\ g}$	Límite inferior para la cantidad de residuos procesados en la planta de procesamiento $pp-wn$ con la tecnología $n-wn$.

$F \min_{wn, pp-wn, n-wn, q}^{procesing}$ Límite superior para la cantidad de residuos procesados en la planta $pp-wn$ con la tecnología $n-wn$.

$PD_{wn, n-wn}^{city}$ Demanda del producto producido con la tecnología $n-wn$ en la ciudad c .

Obj^{LB} Límite inferior para la función objetivo obj .

Obj^{UB} Límite superior para función objetivo obj .

$\alpha_{wn, c}^{sep}$ Factor de separación de los residuos.

$\alpha_{wn, n-wn}^{prod}$ Factor de eficiencia de los residuos a productos.

Variables

AFS Solución Factible Promedio

$A_{wn, pp-wn, n-wn}^{procesing}$ Parte fija del costo de capital para las instalaciones de procesamiento.

$B_{wn, pp-wn, n-wn}^{cao}$ Parte variable del costo de capital que depende de la capacidad de las plantas de procesamiento.

$CostCap_{wn, pp-wn, n-wn}^{procesing}$ Costo de capital por procesar los residuos.

$CostCap^{total}$ Costo de capital total.

$CostNSep^{total}$ Costo de total por no desechar los residuos sin tratarlos.

$CostOp^{procesing}$ Costo de operación total.

$CostOp_{wn}^{procesing}$ Costo de operación por tipo de residuo wn .

$CostSep_{wn}$ Costo de separación por tipo de residuo wn .

$CostSep^{total}$	Costo total de separación.
$CostTransp^{city,pp}$	Costo de total transporte de los residuos desde las ciudades hasta las plantas de procesamiento
$CostTransp^{pp,city}_{wn}$	Costo de transporte de los productos desde las plantas hasta las ciudades por tipo de residuo wn .
$CostTransp^{pp}_{city}$	Costo de total transporte de los productos desde las plantas hasta las ciudades
CS	Solución compromiso.
C^{sales}	Beneficio económico a partir de las ventas de los productos
C^{sales}_{wn}	Beneficio económico de la venta de los productos por tipo de residuo wn .
$F^{plant}_{wn,c,pp-wn}$	Cantidad de residuos enviados desde la ciudad c hasta la planta de procesamiento $pp-wn$.
FS_k	Solución Factible por caso k .
$F^{tech}_{wn,pp-wn,n-wn}$	Cantidad de residuos enviados desde la planta de procesamiento $pp-wn$ hacia la tecnología $n-wn$.
F_c^{total}	Cantidad total de residuos producidos en todas las ciudades.
$F_{wn,c}$	Cantidad de residuos del tipo wn reusada proveniente de la ciudad c para producir un tipo de producto $p-wn$.
<i>Government expenditure</i>	Gastos del gobierno.

NetProfit	Beneficio económico neto total.
$P_{wn,pp-wn,n-wn}$	Cantidad de productos producidos en la planta de procesamiento $pp-wn$ y con la tecnología $n-wn$.
$P_{wn,pp-wn,c,n-wn}^{city}$	Cantidad de producto distribuido en la ciudad c .
$Profit_{wn}$	Beneficio económico neto por tipo de residuo wn .
$PT_{wn,c,n-wn}^{city}$	Cantidad total de producto en una ciudad determinada c .
$TotalConsume^{waste}$	Porcentaje total de RSU consumidos.
$W_k^{NetProfit}$	Peso asignado a la variable p para cada función objetivo obj .
ρ^{obj}	Función objetivo obj escalada.

Variables binarias

$y_{wn,pp-wn,n-wn}^{procesing}$	Variable binaria que define la existencia de las plantas de procesamiento.
---------------------------------	--

Planificación estratégica de sistemas para el manejo de los RSU bajo incertidumbre, considerando a las diferentes partes interesadas

Parámetros

$OptF^{max}$	Máximo valor para la función optimista (1×10^9).
OF_{obj}^{UB}	Límite superior para la función objetivo optimista obj .
OF_{obj}^{LB}	Límite inferior para la función objetivo optimista obj .
MF_{obj}^{UB}	Límite superior para la función objetivo promedio obj .
MF_{obj}^{LB}	Límite inferior para la función objetivo promedio obj .
PF_{obj}^{UB}	Límite superior para la función objetivo pesimista obj .

PF_{obj}^{LB} Límite inferior para la función objetivo pesimista obj .

Variables

$OptFunction_{obj}$ Función optimista para cada función objetivo obj .

$MeanFunction_{obj}$ Función promedio para cada función objetivo obj .

$PessimisticFunction_{obj}$ Función pesimista para cada función obj .

NOF_{obj} Función normalizada para la función objetivo optimistas obj .

NMF_{obj} Función normalizada para la función objetivo promedio obj .

NPF_{obj} Función normalizada para la función objetivo pesimistas obj .

CUF_{obj} Solución compromiso individual para cada función objetivo obj .

OCS Solución objetivo total

Variables Binarias

$y_{obj,e}^{op}$ Variable binaria para limitar el valor de la función objetivo optimista obj .

Agradecimientos

Quiero agradecer a mi asesor el Dr. Fabricio Nápoles Rivera, por todo su apoyo y enseñanzas para el desarrollo de mi tesis y mi formación académica, así como darme las bases para seguir adelante en el área de investigación.

Quiero agradecer a mi coasesor el Dr. José María Ponce Ortega por su apoyo en este proyecto y en mi desarrollo profesional, así como por alentarme a publicar artículos.

Quiero agradecer al resto de mi comité tutorial por aportarme las observaciones necesarias para presentar un buen trabajo de investigación:

Dra. Ma. Carmen Chávez Parga

Dr. José Ezequiel Santibáñez Aguilar

Dr. Rafael Huirache Acuña

Quiero agradecer a mis padres, Graciela Fernández Miguel y Camilo Díaz Barriga Silva por apoyarme en todo momento a seguir con mis estudios y alentarme a ser mejor cada día.

Quiero agradecer a mi novio Mariano por siempre estar ahí para mí, en los buenos y malos momentos y ayudarme a sobreponerme a cualquier obstáculo en mi vida.

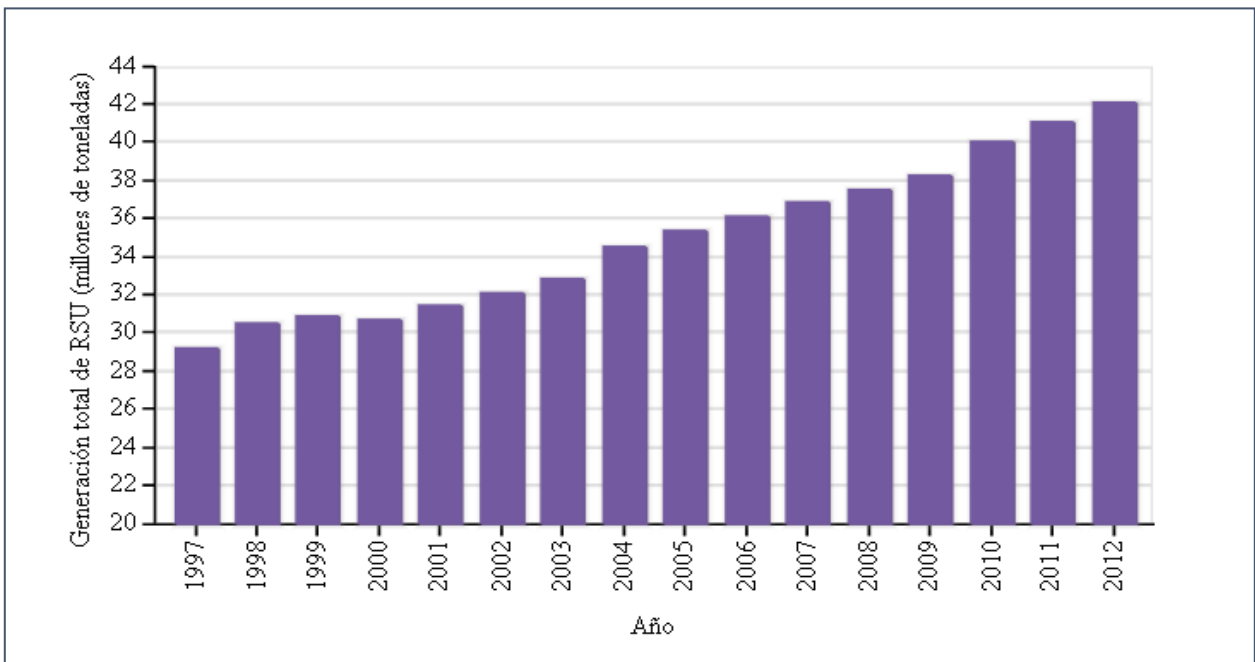
Y por último y no menos importante a mis hermanos Ahmed y Alfonso que siempre me apoyaron en todos los aspectos y que sin su ayuda no me hubiera desempeñado, como lo hice en el desarrollo de este trabajo.

Capítulo 1. Introducción

En el primer capítulo se aborda el tema del cual se propone este proyecto de investigación, mediante las generalidades de los residuos sólidos urbanos (RSU) en México. En seguida son introducidos los objetivos de este trabajo, los cuales dictan que es lo que se busca alcanzar con el desarrollo de este trabajo. Después se describe la justificación y el alcance del proyecto de investigación, que expresa la importancia de llevarlo a cabo. Por último se propone una hipótesis para esta tesis, que determina los resultados esperados al culminar el proyecto.

1.1 Generalidades

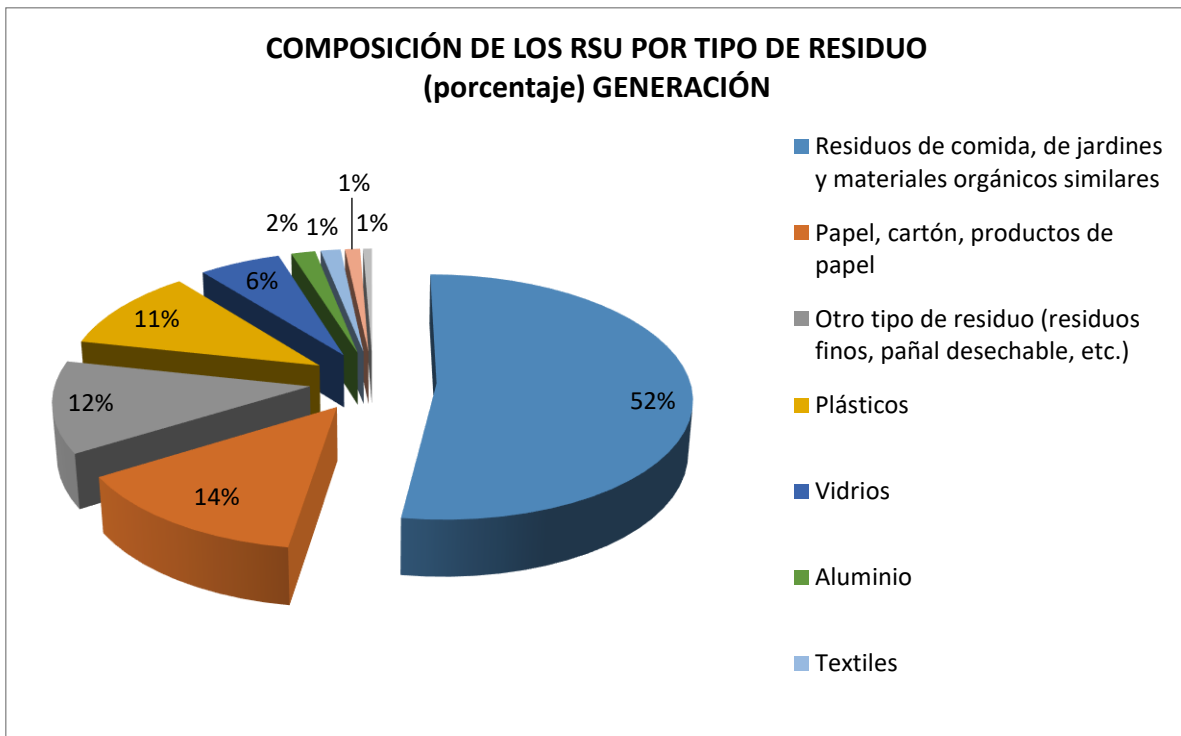
Durante el 2012, en México se generaron 42,1 millones de toneladas de RSU anuales, lo que equivale a 0.99 kilogramos diarios per cápita, 15% más que en el año 2000. En los últimos años la generación de estos residuos se ha incrementado en más del 90% pasando de 21,9 millones de toneladas en 1992 a 41.1 millones de toneladas en el 2012.



1Figura 1.1.1 Generación de RSU millones de toneladas. Sedesol. México. 2013.

Los RSU en México en el 2012 estuvieron compuestos por un 52.4% de residuos orgánicos (residuos de comida, jardín, etcétera); el 34% de residuos potencialmente

aprovechables (13.8% papel y cartón, 10.9% plásticos, 5.9% vidrio y 3.4% metales) y el 13.6% restante se integraba de otros residuos (12.1%) y (1.4%) textiles.



2Figura 1.1.2 Composición de los RSU por tipo de residuo. Sedesol. México. 2012.

Debido a la composición de los RSU, es correcto inferir que una gran cantidad de estos es apta para ser reaprovechada, en la formación de composta, en la recuperación de energía como gasificación o en el reciclaje. Como consecuencia la cantidad a tratarse como RSU sería mucho menor.

Es importante notar que en los países en desarrollo, debido a las forma en que están distribuidos los asentamientos humanos, la configuración espacial y la localización de las escasas unidades de gestión (centros de transferencia, plantas de reciclaje, plantas de compostaje) vuelve económicamente insostenible ciertas acciones como la separación de residuos en el origen, el reciclaje y el compostaje (Broitman y col., 2012). Por lo que la implementación de un modelo sustentable está limitada por la optimización de los costos.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General.

Determinar la cadena de suministro óptima para el sistema de gestión de los RSU, al mismo tiempo tratar de lograr el máximo beneficio para las diferentes partes interesadas, mediante la aplicación varios esquemas de optimización multi-objetivo.

Así como también analizar la planificación del manejo RSU, tomando en cuenta la incertidumbre en la disponibilidad de los residuos y en los precios de los productos. Evaluando tres casos: optimista, promedio y pesimista, y tomando en cuenta a las diferentes partes interesadas

1.2.2. Objetivos Específicos

1. Proponer una superestructura para la cadena de suministros de los RSU
2. Desarrollar un modelo matemático que describa la superestructura propuesta.
3. Proponer una nueva metodología que considera la asignación de diferentes funciones peso a las diferentes funciones objetivo, aplicando el método de muestreo del hipercubo latino para generar los valores de los pesos.
4. Aplicar las diferentes estrategias multiobjetivo en tres escenarios.
5. Determinar cuál es la mejor estrategia multiobjetivo que cumple nuestro objetivo general
6. Generar el modelo matemático que involucra a la incertidumbre, para la planificación del manejo de los RSU.
7. Generar el modelo que involucra la incertidumbre en tres casos: optimista, promedio y pesimista, con tres desviaciones estándar diferentes.
8. Agregar al modelo que toma la incertidumbre la parte que involucra a las diferentes partes interesadas.
9. Obtener los resultados al aplicar la solución compromiso (SC).

1.3 Justificación

La recolección de RSU está ligada con la salud pública, la ausencia de esta actividad ocasiona la proliferación de enfermedades infecciosas, por lo que los gobiernos locales tienen la responsabilidad de ofrecer dicho servicio (ONU-Hábitat, 2010:XX)

El manejo inadecuado de los RSU tiene varios aspectos negativos en el medio ambiente, por ejemplo, la disposición final de los RSU en los vertederos de basura al aire libre produce malos olores y un ambiente propicio para roedores e insectos que son portadores de enfermedades, los rellenos sanitarios provocan la contaminación del suelo y de aguas subterráneas, además de que la descomposición de la parte orgánica genera gases de efecto invernadero.

Algunos ejemplos de investigaciones que se han enfocado en el manejo son Chen y Chang (2010) quienes desarrollaron un modelo que evalúa el desempeño de un sistema para el reciclado de los RSU, Santibañez-Aguilar y col. (2013) quienes reportaron un sistema óptimo para la planeación de la cadena de suministro de los RSU, Tan y col. (2014) que reportaron un modelo de optimización para integrar las cuatro tecnologías más usadas y así obtener una red de proceso redituable y Vandebo y col. (2014) Quienes presentaron un modelo multi-objetivo mixto entero lineal (MILP) para la toma de decisiones en el ámbito del manejo de residuos y recursos en redes industriales.

Anteriormente se han presentado varias publicaciones que tienen que ver con el manejo de los RSU, sin embargo la mayoría considera el beneficio total asociado con todo el sistema de gestión de RSU sin tener en cuenta el beneficio individual de cada uno de los participantes involucrados en la cadena de suministro. Lo cual puede producir soluciones poco prácticas donde los beneficios totales se maximizan a costa de soluciones subóptimas o incluso pérdidas económicas para algunos de los participantes y como consecuencia hacen menos atractiva la participación de las empresas que se encargan de procesar residuos.

Por lo tanto, es importante desarrollar un enfoque de optimización para la planificación estratégica del sistema de gestión de RSU que responda a los objetivos de los diferentes participantes en la cadena de suministro y para obtener soluciones donde todos los participantes se beneficien.

Además, al analizar la planificación del manejo de los RSU tomando en cuenta la incertidumbre proporcionará resultados más amplios acerca de cómo influyen las variables con incertidumbre en los resultados. Adicionalmente, al analizar los tres casos optimista, promedio y pesimista, les damos a los tomadores de decisiones mejores herramientas para tomar una decisión que implique riesgo o no, dependiendo a sus conveniencias.

Y por último, se obtendrán soluciones que beneficien a las diferentes partes pero tomando en cuenta a la incertidumbre, lo cual aportará soluciones de que es lo más probable que pueda suceder.

1.4 Alcance

En esta investigación, en la primera parte se pretende encontrar la configuración óptima para el manejo de los RSU, mediante la propuesta y optimización de un modelo matemático. Además, que la solución óptima no solo beneficie a una de las partes si no a la mayoría de las partes involucradas.

En la segunda parte, se pretende analizar para tres casos (optimista, promedio y pesimista) el problema anterior tomando en cuenta la incertidumbre asociada y después encontrar la solución óptima que beneficie a las diferentes partes interesadas en los 10 diferentes escenarios generados.

1.5 Hipótesis

La aplicación de diferentes esquemas multiobjetivo para la planificación estratégica de los sistemas de gestión de RSU sin tomar y tomando en cuenta la incertidumbre proporcionará soluciones y herramientas para la toma de decisiones que beneficiaran a todas las partes involucradas en la cadena de suministro de los residuos y como resultado habrá una mayor inversión en el manejo de los RSU. Además, nos permitirá el aprovechamiento de recursos que de otra manera serían desechados y como consecuencia se obtendrán beneficios económicos, sociales y ambientales.

Capítulo 2. Marco Teórico

Como resultado del crecimiento poblacional y el desarrollo económico, la generación de los RSU ha incrementado drásticamente. Actualmente, el promedio de RSU generados es de 1.2kg per cápita al día y se estima que para el año 2025 aumente a 1.4Kg/cápita/día (Hoorweg y Badha-Tata., 2012). El método más utilizado en varias partes del mundo, para el manejo de los RSU, es la disposición de éstos en rellenos sanitario (Leme y col., 2014). Sin embargo, la disposición de los residuos en rellenos sanitarios es una manera inefectiva para el manejo de los RSU, ya que causa la degradación de valiosos terrenos, incrementa el costo de los terrenos y crea problemas a largo plazo al ambiente y a la salud humana (Gracida-Alvarez y col., 2016). Por lo que se necesitan sistemas eficientes y sustentables para mejorar el manejo de los RSU (Tan y col., 2014).

El desarrollo de un sistema óptimo para el manejo de los RSU es una ardua tarea, que involucra la selección óptima de rutas para la recolección de los residuos, estaciones de transferencia, estrategias de tratamiento, locación de las plantas de tratamiento y sistemas para convertir los residuos en energía (Dewi y col., 2017).

Varias investigaciones se han enfocado en el manejo de los RSU, por ejemplo Warren y El Halwagi (1996) estudiaron la conversión de los RSU en hidrógeno y combustibles líquidos. Chen y Chang (2010) desarrollaron un modelo que evalúa el desempeño de un sistema para el reciclado de los RSU, en Taiwan. Sin embargo, aspectos como costos y la protección del ambiente no fueron considerados en este trabajo. Por otro lado Tan y col. (2014) reportaron un modelo de optimización para integrar las cuatro tecnologías más usadas y así obtener una red de proceso redituable. Vandebo et al. presentaron un modelo multi-objetivo mixto entero lineal (MILP) para la toma de decisiones en el ámbito del manejo de residuos y recursos en redes industriales. Rada y col. (2014) reportaron un enfoque que considera las interacciones entre el turismo y la recolección selectiva de los RSU.

Ng y col. (2014) incorporaron el caso de desperdicio a energía en el manejo de los SRU, analizando un caso de Malasia. Sukholthaman y Shrahada (2015) presentaron aproximaciones para reducir los impactos de los sistemas poco eficientes para el manejo de los RSU, en Bangkok. Santibáñez-Aguilar y col. (2015) consideraron los problemas

económicos y ambientales en el diseño de sistemas para el reúso de RSU e incluyeron una función objetivo para la seguridad. Carvalho y col. (2015) Presento un enfoque que toma en cuenta las economías de escala en el sistema de manejo de los RSU.

Recientemente, Mirmajlesi y Shafei (2016) reportaron un modelo multi-periodo, multi-producto y multi-eslabón para el diseño de cadenas de suministro. Chifari y col. (2016) desarrollaron un sistema holístico para organizar e integrar cuantitativamente la información y caracterizar el desempeño de los sistemas de RSU. Sukholthaman y Sharp (2016) analizaron la dinámica para los sistemas para el manejo de RSU. Santibañez-Aguilar y col. (2013) reportaron un sistema óptimo para la planeación de la cadena de suministro de los RSU. Korai y col. (2017) evaluaron la factibilidad de usar los RSU para la generación de energía en Pakistán. En el mismo sentido, Harijani y col (2017) desarrollaron una aproximación sistemática para construir e integrar el reciclaje y las redes de RSU, considerando la sustentabilidad con el objetivo de maximizar el beneficio económico bajo una restricción presupuestaria. Gilardino y col. Reportaron un estudio para la localización de sitios para los RSU.

En muchos casos, los sistemas para el manejo de los RSU involucran a diferentes partes interesadas con diferentes objetivos y obligaciones (Achillas y col., 2013). También, es importante notar que trabajos anteriores para la planificación estratégica de los RSU no han considerado las interacciones y los intereses en conflicto de los diferentes actores involucrados (Morrissey y col. 2004). Las publicaciones anteriores consideran el beneficio económico asociado con el sistema completo para el manejo de los RSU sin tomar en cuenta el beneficio económico de cada participante en la cadena de suministro. Al maximizar el beneficio económico total a expensas de soluciones subóptimas, puede producir soluciones imprácticas e incluso pérdidas económicas para algunos de los participantes. Por lo tanto, es importante desarrollar una aproximación estratégica para la planificación para el manejo de RSU que considere los objetivos para cada uno de los organismos involucrados, para obtener soluciones donde todos los participantes sean beneficiados.

Al utilizar una herramienta de decisión multi-criterio, se da la posibilidad de tomar decisiones con mayor información y de esta manera conseguir resultados óptimos

(Vucijak y col., 2016). Este tema ha sido la razón de varias publicaciones (Soltani y col., 2015; Fuentes-Cortes y col., 2016; Dowling y col., 2016; Giri y col., 2016; Chanthawong and Dhakal, 2016; Kannan 2017).

En la primera parte de éste trabajo se propone una aproximación de optimización para la planeación estrategia de sistemas para el manejo de RSU a través de un esquema multi-objetivo que toma encuesta a los diferentes organismos involucrados en la cadena de suministros de los RSU. El modelo incorpora un nuevo esquema de optimización para el problema que involucra a las diferentes partes interesadas y además considera todas las actividades en el manejo de los RSU como la recolección, transporte, reciclaje y distribución de productos. Un caso de estudio fue analizado, junto con tres escenarios diferentes para comprobar la utilidad del modelo.

Debido a que la composición de los RSU depende de varios factores, como el crecimiento poblacional, patrones de consumo, estaciones, clima, etc. Las incertidumbres asociadas al manejo de los RSU deben ser consideradas. Por consiguiente, McLean y Li (2013) presentaron una estrategia sinérgica para la optimización de la cadena de suministros bajo incertidumbre. Yada y col. (2017) desarrollaron un algoritmo, basado en un análisis de intervalos, para lidiar con las incertidumbres involucradas y encontrar la locación óptima de las instalaciones para el manejo de los RSU. Laokhongthavorn y Chalida (2017) presentaron un trabajo para optimizar dos funciones objetivo; el costo operacional esperado y el equivalente esperado de emisiones de dióxido de carbono en un sistema de disposición de RSU, aplicando cantidades de incertidumbre en los RSU y el costo de la electricidad. Xu y col. (2017) investigaron un diseño para la cadena de suministros inversa global, considerando aspectos como la protección al ambiente, conservación de recursos y el desarrollo de las operaciones de logística y tecnología para la manufacturación. Ellos centraron la incertidumbre en tres aspectos principalmente: niveles de recolección de residuos, emisiones de carbono asociadas y retos impuestos por la cadena de suministros, particularmente los costos de transporte marítimo y las actuales tasas de cambio. Ma y col. (2017) desarrollaron un modelo para el manejo de los RSU que integra dos tipos de conjuntos difusos de programación limitada al azar, en su modelo la evaluación y expresión de la incertidumbre supera los inconvenientes al

describir las distribuciones de posibilidades difusas como formas simplificadas. Mishra y col. (2017) cuantificó la incertidumbre en los riesgos a la salud humana por la contaminación de los lixiviados de los rellenos sanitarios, en niños y adultos investigando los riesgos a largo plazo usando el sistema Monte Carlo para la simulación, mediante la selección de metales pesados.

Sin, embargo en ninguna de la investigaciones anteriores se tomó en cuenta la incertidumbre y a la vez a los diferentes organismos involucrados, buscando una solución que beneficiara a todas las partes. Por lo tanto en la segunda parte de éste trabajo se toma en cuenta la incertidumbre en la disponibilidad de los RSU y en los precios de productos obtenidos a partir de los residuos, así como los diferentes participantes involucrado en tres diferentes casos principalmente: optimista, promedio y pesimista.

Capítulo 3. Metodología

La metodología se ha dividido en dos secciones, la primera aborda la planificación estratégica de sistemas para el manejo de los RSU considerando a las diferentes partes interesadas. La segunda sección se basa en proponer la planificación estratégica para sistemas para el manejo de RSU bajo incertidumbre, considerando a las diferentes partes interesadas. A continuación se describen el caso de estudio para la tesis y detalladamente las dos secciones.

3.1 Casos de estudio

Cinco ciudades de la parte central oeste de México fueron consideradas como las principales fuentes de RSU, así como los principales lugares donde se distribuirán los productos producidos a partir de los residuos. Quince tecnologías fueron consideradas para el tratamiento de los RSU. La cantidad de residuos por tipo de residuos *wn* producidos en las ciudades tomadas en cuenta para el modelo se muestran en la Tabla 10.1. (INE, 2012; EPA, 2001).

Tabla 3.1.1 Residuos generados por tipo y subtipo de residuos en cada ciudad y eficiencia de recolección de estos.

	Ciudad	Morelia	Celaya	Apatzingán	Lázaro Cárdenas	Leon ^a	Eficiencia de recolección
RSU	Producción total	4.35E+08	2.00E+08	5.49E+07	9.72E+07	5.23E+08	
	No reciclables (70.3% RSU)	3.06E+08	1.41E+08	3.84E+07	6.83E+07	3.68E+08	10
Plásticos	Producción total	2.52E+07	1.16E+07	3.16E+06	5.64E+06	3.03E+07	
	HDPE(T)	2.69E+06	1.24E+06	3.38E+05	6.02E+07	3.24E+06	6.4
	PE(T)	6.30E+06	2.91E+06	7.91E+05	1.41E+06	7.59E+06	6.4
	PET(T)	3.68E+07	1.70E+05	4.62E+04	8.23E+04	4.43E+05	6.4
	PP(T)	9.37E+06	4.32E+06	1.18E+06	2.09E+06	1.13E+07	6.4
	PS(T)	1.33E+06	6.15E+05	1.67E+05	2.98E+08	1.61E+06	6.4
Metales	Producción total	1.35E+07	6.21E+06	1.69E+06	3.01E+06	1.62E+07	
	Aluminio (T)	8.24E+05	3.80E+05	1.03E+07	1.84E+05	9.91E+05	35.8
Vidrio	Producción total	2.87E+07	1.32E+07	3.60E+06	6.42E+06	3.45E+07	
	Vidrio claro (T)	5.21E+06	2.40E+06	6.54E+07	1.17E+06	6.27E+06	24.7
	Vidrio verde (T)	6.10E+06	2.81E+06	7.66E+05	1.36E+06	7.34E+06	4.14
	Vidrio café (T)	1.74E+07	8.01E+06	2.18E+06	3.89E+06	2.09E+07	1.81
Papel	Producción total	6.17E+07	2.85E+07	7.75E+06	1.38E+07	7.43E+07	
	Papel útil	2.58E+07	1.19E+07	3.23E+06	5.76E+06	3.10E+07	7.16

^a Instituto Nacional de Ecología de México (2012).

^b Environmental Protection Agency Office of Resource Conservation and Recovery (2011).

El costo de transporte de los productos y de los residuos, así como las distancias entre las ciudades consideradas se muestran en la Tabla 10.2. El costo de separación para cada tipo de residuo se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3.1.2. Distancias desde las ciudades hasta las plantas de procesamiento y precios unitarios de transporte ^a

Ciudades	Distancia de la planta de procesamiento localizada en las diferentes ciudades (km)				
	Morelia	Celaya	Apatzingán	Lázaro Cárdenas	León
Morelia	1	147	192	144	207
Celaya	147	1	326	447	135
Apatzingán	192	326	1	186	393
Lázaro Cárdenas	144	447	186	1	514
León	207	135	393	514	1
Costo unitario de transporte (\$US/kg km)	1.65E-05 ^A	4.00E-05 ^B			

^A Para plásticos, RSU y papel.

^B Metales y vidrio.

^a Secretaría de comunicaciones y transportes de México (2012).

Tabla 3.1.3. Costo unitario de separación por tipo de residuo.

Tipo de residuo	Costo unitario de separación (\$US/kg)
Plásticos	0.2235
Metales	0.02
Vidrios	0.0008
Papel	0.04

No reciclables	0.026
----------------	-------

Tres escenarios para el manejo de RSU basados en los datos anteriores son analizados en la primera parte de este trabajo para aplicar la nueva metodología. Las partes interesadas (stakeholders) consideradas son las empresas que reciclan cada tipo de residuo, el porcentaje de residuos consumidos y los gastos del gobierno. Los tres escenarios se describen a continuación.

Escenario 1

El escenario 1 implica la separación de los RSU como responsabilidad de cada industria recicladora involucrada. Aquí el beneficio neto total (BENT) considera los gastos del gobierno, así como los costos de producción de los productos y el beneficio económico por las ventas de los productos.

Escenario 2

En cuanto al escenario 2, el gobierno cubre el costo asociado a la separación de los residuos. La idea principal de esta suposición es que si el gobierno se encarga del costo de separación, el reciclaje de diferentes materiales será más atractivo. De esta manera, la inversión de diferentes empresas que reciclan residuos aumentará y menos basura terminará en los vertederos.

Escenario 3

El escenario 3 se supone que la separación de los RSU se da en las casas y establecimientos donde se producen los residuos. Por lo tanto los costos de separación no son considerados. Este es un escenario interesante ya que podría haber varias leyes que obligaran a la gente a separar sus residuos y así este escenario será útil para conocer la solución óptima.

Sin embargo, para el desarrollo de la segunda parte de este trabajo donde se toma en cuenta la incertidumbre solo el primer escenario descrito anteriormente es analizado.

3.2 Planificación estratégica de sistemas para el manejo de los RSU considerando a las diferentes partes interesadas

El problema abordado en esta sección tiene como objetivo determinar la cadena de suministro óptima para el sistema de gestión de los RSM, al mismo tiempo que se trata de lograr el máximo beneficio para las diferentes partes interesadas (véase la **Figura 3.2.1**). Este trabajo considera varias ciudades vecinas que generan diferentes cantidades y tipos de RSU. Para la primera parte de la tesis, se determinaron las tareas óptimas para el retiro, transporte, separación y tratamiento de los RSU y la selección de las instalaciones de procesamiento. Los interesados considerados son el gobierno, los proveedores, los consumidores y los proveedores de servicios para tratar / reciclar los RSM.

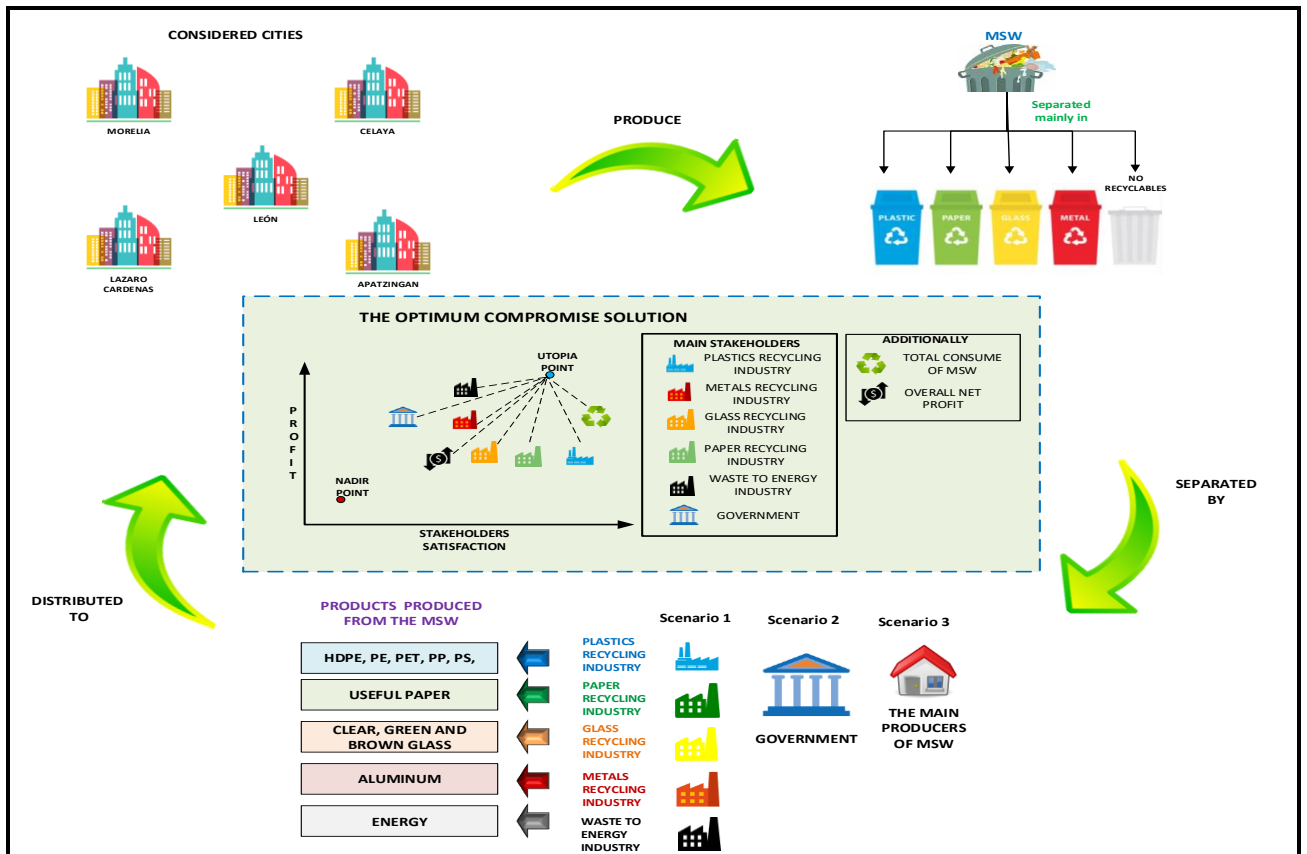


Figura 3.2.1 Planteamiento del problema.

En la **Figura 3.2.1** se muestra una ilustración del planteamiento del problema, que incluye cinco ciudades adyacentes. Estas ciudades producen diferentes cantidades de RSU con diferente composición. Un sistema administrado por el gobierno es responsable de recolectar RSU. La parte recuperable del MSW se divide en cinco materiales principales: plásticos, metales, vidrio, papel y no reciclables. Los residuos no reciclables son enviados a rellenos sanitarios. Dependiendo del escenario analizado, la separación de los residuos es cubierta por cada industria procesadora, gobierno o, los productores de los residuos. Los RSU, después de haber sido separados apropiadamente, pueden ser tratados en diferentes plantas de procesamiento dependiendo del tipo de residuo y de los productos deseados. Se debe optimizar la ubicación, el tipo y el tamaño de las plantas de procesamiento. Los productos se distribuyen a los consumidores potenciales con demandas específicas. Además, se optimizan las rutas de transporte. La configuración óptima para el sistema de gestión de MSW debe considerar el beneficio de todas las

partes interesadas. La siguiente sección describe los pasos para abordar el problema mencionado anteriormente.

3.2.1 Modelo matemático

El modelo propuesto está formulado a partir de la superestructura que se muestra en la **Figura 3.2.1.1**. El índice wn es usado para describir los tipos de residuos que componen a los RSU: plásticos, metales, papel y no reciclables. Las diferentes plantas de procesamiento son representadas por el índice $pp-wn$, las tecnologías para tratar cada subtipo de residuo utilizan el índice $n-wn$ y el tipo de producto producido en estas plantas es identificado con el índice $p-wn$. El índice c representa las ciudades involucradas en el modelo y por último el índice obj representa las funciones objetivo consideradas.

Restricciones para las ciudades que producen RSU

Cada ciudad produce una cantidad específica de residuos sólidos urbanos (RSU), siendo solo una fracción de estos reutilizable. Por lo tanto la cantidad de residuos usados wn para producir el tipo de productos $p-wn$ producido en la ciudad c ($F_{wn,c}$) debe ser menor que la cantidad de residuos reutilizable para producir el tipo de productos $p-wn$ producido en la ciudad c ($\alpha_{wn,c}^{sep} F_{wn,c}^{total}$), donde el flujo de residuos reutilizable es igual al flujo total de residuos producidos en la ciudad c ($F_{wn,c}^{total}$) multiplicado por un factor de separación ($\alpha_{wn,c}^{sep}$), como se muestra en la ecuación 3.2.1.

$$F_{wn,c} \leq \alpha_{wn,c}^{sep} F_{wn,c}^{total}, \quad \forall wn, c \quad (3.2.1)$$

Distribución de los RSU desde las ciudades hasta las plantas procesadoras

Los residuos son distribuidos a diferentes plantas de procesamiento, localizadas en distintas regiones. Cada planta se especializa en un tipo de residuo, como plástico, vidrio, metal o no reciclables, además cuentan con un conjunto de tecnologías dependiendo del tipo de residuo tratado. El balance de masa para un tipo específico de residuo se muestra a continuación: Los residuos seleccionados en la ciudad c ($F_{wn,c}$) son iguales a la sumatoria de los residuos enviados desde las ciudades c hasta la planta de procesamiento $pp-wn$ (por ejemplo, $F_{plastics,c,pp-plastics}^{plant}$ para el plástico) considerando a todos los tipos de residuos.

$$F_{wn,c} = \sum_{pp-wn \in PH} F_{wn,c,pp-wn}^{plant} \quad \forall wn,c \quad (3.2.2)$$

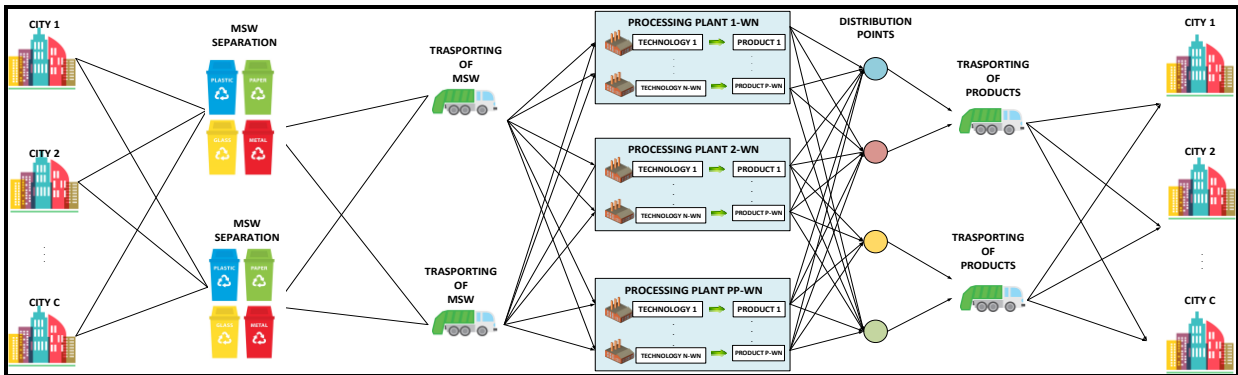


Figura 3.2.1.1 Superestructura propuesta para la cadena de suministros de los RSU.

Distribución de los residuos en las plantas de procesamiento que son tratados con diferentes tecnologías

Los residuos que llegan a las diferentes plantas de tratamiento son distribuidos a diferentes tecnologías según el tipo de residuo y se obtienen distintos productos dependiendo de la tecnología que se utilice. Se tiene que la suma de los materiales que provienen de las ciudades c ($F_{wn,c,pp-wn}^{plant}$) es igual a la suma de los materiales distribuidos a cada una de las tecnologías donde se van a tratar.

$$\sum_{c \in C} F_{wn,c,pp-wn} = \sum_{n-wn \in T} F_{wn,pp-wn,n-wn}^{tech} \quad \forall wn, pp-wn \quad (3.2.3)$$

No existe índice para los productos por que cada tecnología produce solo un producto.

Balance de masa en las plantas de tratamiento

El modelo considera la transformación de los residuos en productos a través de las plantas de tratamiento. Este tipo de procesos son modelados frecuentemente con relaciones no lineales, sin embargo en el presente trabajo se usó un factor de eficiencia para cada tecnología y tipo de residuo tratado ($\alpha_{wn,n-wn}^{prod}$), este factor es útil para conocer la cantidad

de producto ($P_{wn,pp-wn,n-wn}$) que se obtendrá de acuerdo a la cantidad de residuos de un tipo que se van a procesar ($F_{wn,pp-wn,n-wn}^{tech}$).

$$P_{wn,pp-wn,n-wn} = \alpha_{wn,n-wn}^{prod} F_{wn,pp-wn,n-wn}^{tech} \quad \forall wn, pp - wn, n - wn \quad (3.2.4)$$

Los factores de eficiencia son obtenidos mediante la optimización del modelo, mediante simulación y/o están reportados en la literatura.

Balance en los divisores posteriores a las plantas de tratamiento

Una vez que los residuos son procesados, los productos son distribuidos desde las plantas de tratamiento hacia los consumidores localizados en diferentes ciudades c . Por lo tanto la suma de un determinado producto distribuido en todas las ciudades y producido en una planta específica de tratamiento ($P_{wn,pp-wn,c,n-wn}^{city}$) es igual la cantidad producida del producto en la planta de tratamiento específica.

$$P_{wn,pp-wn,n-wn,p-wn} = \sum_{c \in C} P_{wn,pp-wn,c,n-wn}^{city} \quad \forall wn, pp - wn, n - wn \quad (3.2.5)$$

Balance en los puntos de distribución antes de las ciudades

Antes de cada ciudad c , existe un punto de distribución para cada producto donde la cantidad de producto demandada para cada ciudad es obtenida mezclando una cantidad determinada de diferentes plantas según sea el caso, del mismo producto. Entonces la suma de los productos enviados desde diferentes plantas es igual a la cantidad de productos en una determinada ciudad.

$$\sum_{pp-wn \in PROCPLANT} P_{wn,c,n-wn}^{city} = PT_{wn,c,n-wn}^{city}, \quad \forall wn, c, n - wn \quad (3.2.6)$$

Restricciones para la demanda en las ciudades

La cantidad total de un producto determinado en la ciudad c ($PT_{wn,c,n-wn}^{city}$) debe ser menor o igual que la demanda del producto en esa ciudad ($PD_{wn,n-wn}^{city}$). Esto limita la producción ya que de otra manera sería un problema ilimitado.

$$PT_{wn,c,n-wn}^{city} \leq PD_{wn,c,n-wn}^{city}, \quad \forall wn, c, n - wn \quad (3.2.7)$$

Costo de separación de los RSU

La separación se da en dos pasos, primero se separan en general plástico, vidrio, metal y residuos no reciclables y enseguida se da la separación de otros residuos más específicos. El costo de separación es un estimado de las dos etapas de separación

$$CostSep_{wn} = \sum_{c \in C} C_{wn,c}^{sep} F_{wn,c}, \quad \forall wn \quad (3.2.8)$$

También se toma en cuenta el costo total de separación, que sumatoria de cada costo de separación según el tipo de residuo a separar

$$CostSep^{total} = \sum_{wn \in W} CostSep_{wn} \quad (3.2.9)$$

Costo por no separar los RSU

El costo de no separar los residuos, es normalmente pagado por el gobierno a través del uso de rellenos sanitarios, sin embargo esta parte tiene que tomarse en cuenta para poder encontrar una solución más integral. Por lo que el costo por no separar los RSU es igual al costo unitario de no separar los residuos por la cantidad de residuos que no fueron separados.

$$CostNSep^{total} = \sum_{wn \in W} \sum_{c \in C} C_{wn,c}^{no-sep} (F_{wn,c}^{total} - F_{wn,c}) \quad (3.2.10)$$

Costo total por el transporte de los RSU desde las ciudades a las plantas de tratamiento

Una importante actividad es la de transportar los residuos desde las diferentes ciudades a las distintas plantas de tratamiento. Esta actividad tiene un costo asociado que considera el costo unitario de transporte para cualquier tipo de residuo ($C_{wn,p-wn}^{unit-transp}$), así como la distancia entre las ciudades y las plantas de tratamiento ($d_{c,pp-wn}$) y la cantidad de residuos transportados desde las ciudades hasta las plantas ($F_{wn,c,pp-wn,p-wn}^{plant}$).

$$CostTransp_{pp}^{city} = \sum_{wn \in W} \sum_{c \in C} \sum_{pp-wn \in P} C_{wn}^{unit-transp} d_{c,pp-wn} F_{wn,c,pp-wn}^{plant} \quad (3.2.11)$$

Costo total por el transporte de los productos desde las plantas de tratamiento hasta las ciudades.

Otra actividad de transporte tiene que ver con el transporte de los productos producidos en las plantas de tratamiento hasta las ciudades donde se van a consumir. En este caso el costo unitario de transporte depende del tipo de productos a transportar. También se toma en cuenta la distancia desde las plantas de tratamiento hasta las ciudades y la cantidad de producto que se va a transportar.

$$CostTransp_{pp}^{city} = \sum_{wn \in W} \sum_{c \in C} \sum_{pp-wn \in P} \sum_{n-wn \in T} C_{wn,n-wn}^{unit-transp-product} d_{c,pp-wn} P_{wn,c,pp-wn,n-wn}^{city} \quad (3.2.12)$$

Costo de producción en las plantas de tratamiento

Para cada tipo de tecnología se toma en cuenta un costo de producción, el cual se divide en dos secciones. La primera es el costo de operación que considera un costo unitario ($C_{wn,pp-wn,n-wn}^{proceso}$) que depende de la planta de tratamiento $pp-wn$, del tipo de tecnología usada $n-wn$ y el tipo de residuos wn y productos $p-wn$. El costo total de operación depende de la cantidad de material que se va procesar en cada planta ($F_{wn,pp-wn,n-wn}^{tech}$) y la ecuación para el costo de operación queda:

$$CostOp^{proces\ sin\ g} = \sum_{wn \in W} \sum_{pp-wn \in P} \sum_{n-wn \in T} C_{wn, pp-wn, n-wn}^{proces\ sin\ g} F_{wn, pp-wn, n-wn}^{tech} \quad (3.2.13)$$

La segunda sección considera al costo de capital de las diferentes plantas de tratamiento para obtener soluciones adecuadas. Para calcular este costo se necesita el costo de las unidades consideradas, donde el costo de capital es una función del tipo $A_{wn, pp-wn, n-wn}^{proces\ sin\ g} + B_{wn, pp-wn, n-wn}^{cao} (F_{wn, pp-wn, n-wn}^{tech})^\alpha$, donde α se usa para tomar en cuenta la economía de escala; siendo en este contexto una función no lineal que puede generar problemas en la simulación, así que la función puede modificarse para que sea una función lineal de la forma $A_{wn, pp-wn, n-wn}^{proces\ sin\ g} + B_{wn, pp-wn, n-wn}^{cao}$, donde $B_{wn, pp-wn, n-wn}^{cao}$ es el costo variable del costo de capital.

Mientras que el costo de capital para cada planta de tratamiento está dado por la siguiente ecuación:

$$CostCap_{wn, pp-wn, n-wn}^{proces\ sin\ g} = A_{wn, pp-wn, n-wn}^{proces\ sin\ g} + B_{wn, pp-wn, n-wn}^{cao}, \quad \forall wn, pp - wn, n - wn \quad (3.2.14)$$

Una vez que el costo de capital individual es calculado, es posible obtener el costo de capital total, que es la suma de los costos de capital individuales ($CostCap_{wn, pp-wn, n-wn}^{proces\ sin\ g}$) para cada tipo de residuo, planta de tratamiento y tecnología.

$$CostCap^{total} = \sum_{wn \in W} \sum_{pp-wn \in P} \sum_{n-wn \in T} CostCap_{wn, pp-wn, n-wn}^{proces\ sin\ g} \quad (3.2.15)$$

Los términos del costo de capital de las diferentes tecnologías dependen de su capacidad, la cual está definida por las siguientes disyunciones, que son activadas cuando los residuos usados como materia prima están entre los límites mínimo y máximo.

$$\forall q \left[\begin{array}{l} y_{wn, pp-wn, n-wn, q}^{proces\ sin\ g} \\ A_{wn, pp-wn, n-wn}^{proces\ sin\ g} = a_{wn, pp-wn, n-wn, q}^{proces\ sin\ g} \\ B_{wn, pp-wn, n-wn}^{proces\ sin\ g} = b_{wn, pp-wn, n-wn, q}^{proces\ sin\ g} dF_{wn, pp-wn, n-wn, q}^{tech} \\ F_{wn, pp-wn, n-wn, q}^{min\ proces\ sin\ g} \leq F_{wn, pp-wn, n-wn}^{tech} \leq F_{wn, pp-wn, n-wn, q}^{max\ proces\ sin\ g} \end{array} \right] \forall wn, pp - wn, n - wn, q$$

La disyunción anterior es reformulada algebraicamente como se muestra a continuación:

$$A_{wn, pp-wn, n-wn}^{proces\ sin\ g} = \sum_{q \in I} a_{wn, pp-wn, n-wn, q}^{proces\ sin\ g} y_{wn, pp-wn, n-wn, q}^{proces\ sin\ g}, \quad \forall wn, pp - wn, n - wn \quad (3.2.16)$$

$$B_{wn, pp-wn, n-wn}^{proces\ sin\ g} = \sum_{q \in I} b_{wn, pp-wn, n-wn, q}^{proces\ sin\ g} dF_{wn, pp-wn, n-wn, q}^{tech}, \quad \forall wn, pp - wn, n - wn \quad (3.2.17)$$

La ecuación (3.2.16) es usada para definir la parte fija del costo de capital ($A_{wn, pp-wn, n-wn}^{proces\ sin\ g}$), que depende de la planta de tratamiento, la tecnología para procesar el tipo de residuo y el tipo de residuo. Siendo entonces ($B_{wn, pp-wn, n-wn}^{proces\ sin\ g}$) la parte variable del costo de capital como se muestra en la ecuación (3.2.17). La cantidad asignada de residuos en las plantas de tratamiento ($F_{wn, pp-wn, n-wn}^{tech}$) es asignada en la ecuación (3.2.18) y esta cantidad está limitada por las ecuaciones (3.2.19) y (3.2.20).

$$F_{wn, pp-wn, n-wn}^{tech} = \sum_{q \in I} dF_{wn, pp-wn, n-wn, q}^{tech}, \quad \forall wn, pp - wn, n - wn \quad (3.2.18)$$

$$F \min_{wn, pp-wn, n-wn, q}^{proces\ sin\ g} y_{wn, pp-wn, n-wn, q}^{proces\ sin\ g} \leq dF_{wn, pp-wn, n-wn, q}^{tech}, \quad \forall wn, pp - wn, n - wn, q \quad (3.2.19)$$

$$F \max_{wn, pp-wn, n-wn, q}^{proces\ sin\ g} y_{wn, pp-wn, n-wn, q}^{proces\ sin\ g} \geq dF_{wn, pp-wn, n-wn, q}^{tech}, \quad \forall wn, pp - wn, n - wn, p - wn, q \quad (3.2.20)$$

Además la ecuación (3.2.21) es usada para limitar a 1, el número de intervalos, que se basan en la escala económica.

$$\sum_{q \in I} y_{wn, pp-wn, n-wn, q}^{proces\ sin\ g} = 1, \quad \forall wn, pp - wn, n - wn \quad (3.2.21)$$

Beneficio económico por la venta de productos

Los productos producidos pueden venderse en diferentes mercados, en este caso los mercados están localizados alrededor de las ciudades consideradas, cada producto tiene

un costo unitario, el cual depende del tipo de producto y la ciudad donde se venderá. Los precios cambian respecto a la ciudad ya que cada ciudad tiene diferentes demandas del producto y diferentes condiciones de los mercados. El beneficio económico por la venta de los productos (C^{sales}) es la suma de los productos distribuidos en los diferentes mercados ($P_{wn,c,pp-wn,n-wn}^{city}$) multiplicado por el costo unitario correspondiente ($C_{wn,c,n-wn}^{product}$).

$$C^{sales} = \sum_{wn \in W} \sum_{c \in C} \sum_{pp-wn \in P} \sum_{n-wn \in T} P_{wn,c,pp-wn,n-wn}^{city} C_{wn,c,n-wn}^{product} \quad (3.2.22)$$

Costos por tipo de residuo

El costo de separación del tipo de residuo wn debe ser igual a la suma de los costos unitarios por tipo de residuo wn , multiplicado por la cantidad de residuos del tipo wn que provienen de la ciudad c , como se muestra en la ecuación (3.2.8). La cual es válida para cada tipo de residuo wn (p. ej. Plásticos, metales, vidrio, papel y no reciclables).

El costo de operación para cada tipo de residuo wn es igual a la sumatoria del costo unitario por procesar un cierto tipo de residuo wn multiplicado por la cantidad de residuos del tipo wn tratado en la planta de procesamiento $pp-wn$ con la tecnología $n-wn$.

$$CostOp_{wn}^{procesing} = \sum_{pp-wn} \sum_{n-wn} C_{wn,pp-wn,n-wn}^{procesing} F_{wn,pp-wn,n-wn}^{tech}, \forall wn \quad (3.2.23)$$

En cuanto al costo de transporte de los productos, este considera la sumatoria del costo unitario por el transporte de los productos desde la planta de procesamiento y hasta la ciudad donde se consumirán, multiplicado por la distancia entre la planta y la ciudad, y por último multiplicado por la cantidad de producto producida en la planta $pp-wn$.

$$CostTransp_{wn}^{pp-city} = \sum_c \sum_{pp-wn} \sum_{n-wn} C_{wn,n-wn}^{unit-transp-product} d_{c,pp-wn} P_{wn,c,pp-wn,n-wn}^{city}, \forall wn \quad (3.2.24)$$

Beneficio económico por las ventas por el tipo de residuo wn

Para calcular el beneficio económico por las ventas de los productos producidos a partir de cada tipo de residuo wn . Para definir el beneficio se utilizó la ecuación de (3.2.25), donde la sumatoria de los costos unitarios de cada tipo de producto es multiplicada por la cantidad de productos producidos a partir del tipo de residuos wn .

$$C_{wn}^{sales} = \sum_c \sum_{pp=wn} \sum_{n=wn} P_{wn,c,pp=wn,n=wn}^{city} C_{wn,c,n=wn}^{product}, \forall wn \quad (3.2.25)$$

3.2.1.1 Funciones objetivo

El problema propuesto es definido con un enfoque de optimización multi-objetivo y las funciones objetivo consideradas se describen a continuación.

Beneficio Económico Neto Total

El BENT considera las ventas de los productos producidos a partir de todos los tipos de residuos y los costos de separación, transporte y producción de los residuos reutilizados. El BENT es igual al beneficio económico por las ventas de los productos, menos el costo de separación de los residuos, menos el costo de operación, menos el costo de transporte de los residuos a las plantas de procesamiento y menos el costo de transporte de los productos hacia las ciudades donde serán consumidos.

$$\begin{aligned} ONetProfit = & C^{sales} - CostSep^{total} - CostCap^{total} - CostOp^{procesing} \\ & - CostTransp^{city,pp} - CostTransp^{pp,city} - CostNSep^{total} \end{aligned} \quad (3.2.26)$$

Residuos reutilizados totales

El total de residuos consumidos es una función objetivo que considera el impacto ambiental. Aquí se busca maximizar el porcentaje de residuos consumidos (

$TotalConsume^{waste}$), de la parte de los residuos que es aprovechable (

$\sum_{wn \in W} \sum_{c \in C} \sum_{p=wn \in S} \alpha_{wn,c,p=wn}^{sep} F_{c,p=wn}^{total}$), como se muestra en la ecuación (3.2.27).

$$TotalConsume^{waste} = 100 \frac{\sum_{wn \in W} \sum_{c \in C} F_{wn,c}}{\sum_{wn \in W} \sum_{c \in C} \alpha_{wn,c}^{sep} F_{wn,c}^{total}} \quad (3.2.27)$$

El reciclado de residuos afecta de una manera positiva al impacto ambiental y es una buena alternativa para el uso sustentable de los recursos.

Beneficio económico neto por tipo de residuo

La función objetivo para el beneficio económico neto por tipo de residuo wn es igual el beneficio obtenido por las ventas de los productos producidos con el tipo de residuos wn , menos el costo de separación, el costo de operación, costo de capital por tipo de residuo wn y menos e coste de transporte de los productos a las ciudades.

$$\begin{aligned} Profit_{wn} = & C_{wn}^{sales} - CostSep_{wn} - CostOp_{wn}^{procesing} \\ & - CostCap_{wn,pp-wn,n-wn}^{procesing} - CostTranp_{wn}^{city}, \forall wn \end{aligned} \quad (3.2.28)$$

Finalmente, la función objetivo que considera los gastos del gobierno es igual al costo de transporte para recolectar los residuos de las ciudades y llevarlos hasta las plantas de procesamiento, menos el costo total por no separar los residuos. Sin embargo, esta función puede cambiar según el escenario estudiado.

$$Government\ expenditure = CostTransp_{pp}^{city} - CostNSep^{total} \quad (3.2.29)$$

3.2.1.2 Formulación multi-stakeholder

En este trabajo, es implementado un enfoque multi-stakeholder basado en una formulación de optimización multiobjetivo y se describe a continuación. Primeramente, se definen el punto utópico que representa el límite superior (upper bound, UB) de la función objetivo. El límite inferior (lower bound LB) representa el punto más bajo que la función objetivo puede tomar. Por cada función objetivo, una nueva variable (ρ^{obj}) es introducida. Esta nueva variable es el resultado del escalamiento de la función objetivo original entre los límites superior e inferior.

La ecuación que define a la nueva variable ρ , se define como la relación entre el límite superior de la función, menos la función objetivo y el límite superior menos el límite inferior, como se muestra en la ecuación 3.2.30.

$$\rho^{obj} = \frac{Obj^{UB} - Obj}{Obj^{UB} - Obj^{LB}} \quad (3.2.30)$$

3.2.1.3 Solución compromiso

Una vez que las nuevas variables ρ son definidas, la SC es formulada como la suma de ρ para cada función objetivo:

$$\begin{aligned} \min CS = & \rho^{NetProfit} + \rho^{Consume} + \rho^{Profit_{plastics}} + \rho^{Profit_{metals}} \\ & + \rho^{Profit_{paper}} + \rho^{Profit_{glasses}} + \rho^{Profit_{no\ recyclable}} + \rho^{Govexpnd} \end{aligned} \quad (3.2.31)$$

Los límites de las funciones ρ están entre cero y uno, ya que cada función objetivo es escalada.

$$0 \leq \rho^{Obf} \leq 1 \quad (3.2.32)$$

3.2.1.4 Solución factible

La solución factible es definida análogamente a la SC, siendo la mayor diferencia que a cada función ρ se le asigna un determinado peso w , donde k representa el número de escenarios, donde a cada escenario se le asignan diferentes prioridades a las funciones ρ . Por lo tanto por cada escenario se tendrá una solución factible individual.

$$\begin{aligned} FS_k = & w_k^{NetProfit} \rho_k^{NetProfit} + w_k^{Consume} \rho_k^{Consume} + w_k^{Profit_{plastics}} \rho_k^{Profit_{plastics}} \\ & + w_k^{Profit_{metals}} \rho_k^{Profit_{metals}} + w_k^{Profit_{paper}} \rho_k^{Profit_{paper}} + w_k^{Profit_{glasses}} \rho_k^{Profit_{glasses}} \quad \forall k \in K \\ & + w_k^{Profit_{no\ recyclables}} \rho_k^{Profit_{no\ recyclables}} + w_k^{Govexpend} \rho_k^{Govexpend} \end{aligned} \quad (3.2.33)$$

Entonces la solución factible promedio (average feasible solution, AFS) toma en cuenta la media de todos los escenarios.

$$AFS = \frac{\sum_{k=1}^k FS_k}{k} \quad (3.2.34)$$

En este trabajo, se utilizó el método de muestreo hipercubo latino (latin hypercube sampling, LHS) para generar valores aleatorios con una distribución normal para los diferentes escenarios.

3.3 Planificación estratégica de sistemas para el manejo de los RSU bajo incertidumbre, considerando a las diferentes partes interesadas

Para ésta sección se realizaron las actividades, que se describen a continuación:

Se propuso un modelo matemático a partir de la superestructura generada en la primera sección, para 10 escenarios con diferentes valores para la disponibilidad de los RSU y lo precios de los productos. Los valores de estos parámetros fueron obtenidos mediante la generación de datos aleatorios, basada en datos históricos, mediante un algoritmo determinístico llamado “generador” en la interface de GAMS.

Se analizó el modelo para tres casos: optimista, promedio y pesimista. Después se obtuvieron los límites superiores para cada una de las funciones objetivo y enseguida se implementó la parte que considera a las diferentes partes interesadas en el programa GAMS.

Se analizaron los resultados para la solución compromiso total (SCT) y se implementó la parte del modelo que cambia los pesos para que la mayoría de las funciones objetivo se acerque a su máximo individual.

3.3.1 Modelo matemático

A continuación se describe el modelo matemático para la planificación del manejo de los RSU bajo incertidumbre, considerando las diferentes partes interesadas, en tres diferentes casos, optimista, promedio y pesimista. El índice nuevo en esta parte del modelo es e , que representa a los 10 escenarios generados mediante el un algoritmo determinístico llamado “generador”, dentro del software GAMS.

Restricciones para las ciudades que generan RSU

Cada ciudad produce una cantidad específica de RSU, donde solo una parte es reutilizable. Por lo tanto la cantidad de residuos wn de la ciudad c ($F_{wn,c,e}$) debe ser menor que la cantidad de residuos reutilizable de la ciudad c ($\alpha_{wn,c}^{sep} F_{wn,c,e}^{total}$), donde la cantidad de residuos reutilizable es igual al flujo total de residuos producidos en la ciudad c ($F_{wn,c,e}^{total}$) multiplicado por un factor de separación ($\alpha_{wn,c}^{sep}$) para cada uno de los escenarios e , como se muestra a continuación

$$F_{wn,c,e} \leq \alpha_{wn,c}^{sep} F_{wn,c,e}^{total}, \quad \forall wn, c, e \quad (3.3.1)$$

Distribución de los RSU desde las ciudades hasta las plantas procesadoras

Los residuos seleccionados en la ciudad c ($F_{wn,c,e}$) para cada escenario e son iguales a la sumatoria de los residuos enviados desde las ciudades c hasta la planta de procesamiento $pp-wn$ para cada escenario e (por ejemplo, $F_{plastics,c,pp-plastics,e}^{plant}$ para el plástico) considerando a todos los tipos de residuos.

$$F_{wn,c,e} = \sum_{pp-wn \in PH} F_{wn,c,pp-wn,e}^{plant} \quad \forall wn, c, e \quad (3.3.2)$$

Distribución de los residuos en las plantas de procesamiento que son tratados con diferentes tecnologías

La suma de los materiales que provienen de las ciudades c ($F_{wn,c,pp-wn,e}^{plant}$) es igual a la suma de los materiales distribuidos a cada una de las tecnologías donde se van a tratar para cada escenario e .

$$\sum_{c \in C} F_{wn,c,pp-wn,e} = \sum_{n-wn \in T} F_{wn,pp-wn,n-wn,e}^{tech} \quad \forall wn, pp-wn, e \quad (3.3.3)$$

Balance de masa en las plantas de tratamiento

El factor de eficiencia para cada tecnología y tipo de residuo tratado ($\alpha_{wn,n-wn}^{prod}$) multiplicado por la cantidad de residuos de un tipo que se van a procesar ($F_{wn,pp-wn,n-wn,e}^{tech}$),

es igual a la cantidad de producto ($P_{wn,pp-wn,n-wn,e}$), para cada escenario e .

$$P_{wn,pp-wn,n-wn,e} = \alpha_{wn,n-wn}^{prod} F_{wn,pp-wn,n-wn,e}^{tech} \quad \forall wn, pp-wn, n-wn, e \quad (3.3.4)$$

Balance en los divisores posteriores a las plantas de tratamiento

La suma de un determinado producto distribuido en todas las ciudades y producido en una planta específica de tratamiento ($P_{wn,pp-wn,c,n-wn,e}^{city}$) es igual la cantidad producida del producto en la planta de tratamiento específica, para cada escenario e.

$$P_{wn,pp-wn,n-wn,e} = \sum_{c \in C} P_{wn,c,pp-wn,n-wn,e}^{city} \quad \forall wn, pp - wn, n - wn, e \quad (3.3.5)$$

Balance en los puntos de distribución antes de las ciudades

La suma de los productos enviados desde diferentes plantas es igual a la cantidad de productos en una determinada ciudad, para cada escenario e.

$$\sum_{pp-wn \in PROCPLANT} P_{wn,c,pp-n,n-wn,e}^{city} = PT_{wn,c,n-wn,e}^{city}, \quad \forall wn, c, n - wn, e \quad (3.3.6)$$

Restricciones para la demanda en las ciudades

La cantidad total de un producto determinado en la ciudad c ($PT_{wn,c,n-wn,e}^{city}$) debe ser menor o igual que la demanda del producto en esa ciudad ($PD_{wn,n-wn}^{city}$). Esto limita la producción ya que de otra manera sería un problema ilimitado.

$$PT_{wn,c,n-wn,e}^{city} \leq PD_{wn,c,n-wn}^{city}, \quad \forall wn, c, n - wn, e \quad (3.3.7)$$

Costo de separación de los RSU

El costo de separación de los RSU por tipos de residuo es igual a la sumatoria de los costos unitarios para el tipo de residuo wn, multiplicado por la cantidad de residuos que se van a tratar y para cada escenario e.

$$CostSep_{wn,e} = \sum_{c \in C} C_{wn,c}^{sep} F_{wn,c,e}, \quad \forall wn, e \quad (3.3.8)$$

El costo total de separación es igual a la sumatoria de cada costo de separación según el tipo de residuo a separar, para cada escenario e.

$$CostSep_e^{total} = \sum_{wn \in W} CostSep_{wn,e}, \quad \forall e \quad (3.3.9)$$

Costo por no separar los RSU

El costo por no separar los RSU es igual al costo unitario de no separar los residuos, multiplicado por la cantidad de residuos que no fueron separados, para cada escenario e .

$$CostNSep_e^{total} = \sum_{wn \in W} \sum_{c \in C} C_{wn,c}^{no-sep} (F_{wn,c,e}^{total} - F_{wn,c,e}), \quad \forall e \quad (3.3.10)$$

Costo total por el transporte de los RSU desde las ciudades a las plantas de tratamiento

El costo de transportar los residuos desde las diferentes ciudades a las distintas plantas de tratamiento, es igual a la sumatoria del costo unitario de transporte para cualquier tipo de residuo ($C_{wn}^{unit-transport}$), multiplicado por, la distancia entre las ciudades y las plantas de tratamiento ($d_{c,pp-wn}$) y por la cantidad de residuos transportados desde las ciudades hasta las plantas ($F_{wn,c,pp-wn,e}^{plant}$), para cada escenario e .

$$CostTransp_e^{pp} = \sum_{wn \in W} \sum_{c \in C} \sum_{pp-wn \in P} C_{wn}^{unit-transport} d_{c,pp-wn} F_{wn,c,pp-wn,e}^{plant}, \quad \forall e \quad (3.3.11)$$

Costo total por el transporte de los productos desde las plantas de tratamiento hasta las ciudades.

El costo del transporte de los productos producidos en las plantas de tratamiento hasta las ciudades donde se van a consumir, es igual a la sumatoria del costo unitario de transporte, multiplicado por, la distancia desde las plantas de tratamiento hasta las ciudades y por la cantidad de producto que se va a transportar, para cada escenario e .

$$CostTransp_e^{pp} = \sum_{wn \in W} \sum_{c \in C} \sum_{pp-wn \in P} \sum_{n-wn \in T} C_{wn,n-wn}^{unit-transport-product} d_{c,pp-wn} P_{wn,c,pp-wn,n-wn,e}^{city}, \quad \forall e \quad (3.3.12)$$

Costo de producción en las plantas de tratamiento

El costo de operación que considera un costo unitario ($C_{wn,pp-wn,n-wn}^{proces\ sin\ g}$) es igual a la sumatoria del costo unitario de procesamiento, multiplicado por, la cantidad de material que se va procesar en cada planta ($F_{wn,pp-wn,n-wn,e}^{tech}$), para cada escenario e .

$$CostOp_e^{proces\ sin\ g} = \sum_{wn \in W} \sum_{pp-wn \in P} \sum_{n-wn \in T} C_{wn,pp-wn,n-wn}^{proces\ sin\ g} F_{wn,pp-wn,n-wn,e}^{tech}, \quad \forall e \quad (3.3.13)$$

El costo de capital de las diferentes plantas de tratamiento es igual al costo fijo $A_{wn,pp-wn,n-wn,e}^{proces\ sin\ g}$, más al costo variable $B_{wn,pp-wn,n-wn,e}^{cao}$, para cada escenario e .

$$CostCap_{wn,pp-wn,n-wn,e}^{proces\ sin\ g} = A_{wn,pp-wn,n-wn,e}^{proces\ sin\ g} + B_{wn,pp-wn,n-wn,e}^{cao}, \quad \forall wn, pp - wn, n - wn, e \quad (3.3.14)$$

Por lo que el costo de capital total, es la suma de los costos de capital individuales ($CostCap_{wn,pp-wn,n-wn,e}^{proces\ sin\ g}$) para cada tipo de residuo, planta de tratamiento, tecnología y escenario e .

$$CostCap_e^{total} = \sum_{wn \in W} \sum_{pp-wn \in P} \sum_{n-wn \in T} CostCap_{wn,pp-wn,n-wn,e}^{proces\ sin\ g}, \quad \forall e \quad (3.3.15)$$

Los términos del costo de capital de las diferentes tecnologías dependen de su capacidad, la cual está definida por las siguientes disyunciones, que son activadas cuando los residuos usados como materia prima están entre los límites mínimo y máximo.

$$\forall q \left[\begin{array}{l} y_{wn,pp-wn,n-wn,q,e}^{proces\ sin\ g} \\ A_{wn,pp-wn,n-wn,e}^{proces\ sin\ g} = a_{wn,pp-wn,n-wn,q}^{proces\ sin\ g} \\ B_{wn,pp-wn,n-wn,e}^{proces\ sin\ g} = b_{wn,pp-wn,n-wn,q}^{proces\ sin\ g} dF_{wn,pp-wn,n-wn,q,e}^{tech} \\ F_{wn,pp-wn,n-wn,q}^{\min\ proces\ sin\ g} \leq F_{wn,pp-wn,n-wn,e}^{tech} \leq F_{wn,pp-wn,n-wn,q}^{\max\ proces\ sin\ g} \end{array} \right] \quad \forall wn, pp - wn, n - wn, q, e$$

La disyunción anterior es reformulada algebraicamente como se muestra a continuación, para cada tipo de escenario e :

$$A_{wn,pp-wn,n-wn,e}^{proces\ sin\ g} = \sum_{q \in I} a_{wn,pp-wn,n-wn,q}^{proces\ sin\ g} y_{wn,pp-wn,n-wn,q,e}^{proces\ sin\ g}, \quad \forall wn, pp - wn, n - wn, e \quad (3.3.16)$$

$$B_{wn,pp-wn,n-wn,e}^{proces\ sin\ g} = \sum_{q \in I} b_{wn,pp-wn,n-wn,q}^{proces\ sin\ g} dF_{wn,pp-wn,n-wn,q,e}^{tech}, \quad \forall wn, pp - wn, n - wn, e \quad (3.3.17)$$

La ecuación (3.3.16) es usada para definir la parte fija del costo de capital ($A_{wn,pp-wn,n-wn,e}^{proces\ sin\ g}$), que depende de la planta de tratamiento, la tecnología para procesar el tipo de residuo y el tipo de residuo. Siendo entonces ($B_{wn,pp-wn,n-wn,e}^{proces\ sin\ g}$) la parte variable del costo de capital como se muestra en la ecuación (3.3.17). La cantidad asignada de residuos en las plantas de tratamiento ($F_{wn,pp-wn,n-wn,e}^{tech}$) es asignada en la ecuación (3.3.18) y esta cantidad está limitada por las ecuaciones (3.3.19) y (3.3.20).

$$F_{wn,pp-wn,n-wn,e}^{tech} = \sum_{q \in I} dF_{wn,pp-wn,n-wn,q,e}^{tech}, \quad \forall wn, pp - wn, n - wn, e \quad (3.3.18)$$

$$F \min_{wn,pp-wn,n-wn,q}^{proces\ sin\ g} y_{wn,pp-wn,n-wn,q,e}^{proces\ sin\ g} \leq dF_{wn,pp-wn,n-wn,q,e}^{tech}, \quad \forall wn, pp - wn, n - wn, q, e \quad (3.3.19)$$

$$F \max_{wn,pp-wn,n-wn,p-wn,q}^{proces\ sin\ g} y_{wn,pp-wn,n-wn,p-wn,q,e}^{proces\ sin\ g} \geq dF_{wn,pp-wn,n-wn,p-wn,q,e}^{tech}, \quad \forall wn, pp - wn, n - wn, p - wn, q, e \quad (3.3.20)$$

Además la ecuación (3.3.21) es usada para limitar a 1, el número de intervalos, que se basan en la escala económica.

$$\sum_{q \in I} y_{wn,pp-wn,n-wn,q,e}^{proces\ sin\ g} = 1, \quad \forall wn, pp - wn, n - wn \quad (3.3.21)$$

Beneficio económico por la venta de productos

El beneficio económico por la venta de los productos (C^{sales}) es la suma de los productos distribuidos en los diferentes mercados ($P_{wn,c,pp-wn,n-wn}^{city}$) multiplicado por el costo unitario correspondiente ($C_{wn,c,n-wn,e}^{product}$), para cada tipo de escenario e .

$$C_e^{sales} = \sum_{wn \in W} \sum_{c \in C} \sum_{pp-wn \in P} \sum_{n-wn \in T} P_{wn,c,pp-wn,n-wn,e}^{city} C_{wn,c,n-wn,e}^{product}, \quad \forall e \quad (3.3.22)$$

Costos por tipo de residuo

El costo de operación para cada tipo de residuo wn es igual a la sumatoria del costo unitario por procesar un cierto tipo de residuo wn multiplicado por la cantidad de residuos del tipo wn tratado en la planta de procesamiento $pp-wn$ con la tecnología $n-wn$, para cada escenario e .

$$CostOp_{wn,e}^{processing} = \sum_{pp-wn} \sum_{n-wn} C_{wn,pp-wn,n-wn}^{processing} F_{wn,pp-wn,n-wn,e}^{tech}, \quad \forall wn, e \quad (3.3.23)$$

En cuanto al costo de transporte de los productos, este considera la sumatoria del costo unitario por el transporte de los productos desde la planta de procesamiento y hasta la ciudad donde se consumirán, multiplicado por la distancia entre la planta y la ciudad, y por último multiplicado por la cantidad de producto producida en la planta $pp-wn$, para cada escenario e .

$$CostTransp_{wn,e}^{pp} = \sum_c \sum_{pp-wn} \sum_{n-wn} C_{wn,n-wn,pp-wn}^{unit-transp-product} d_{c,pp-wn} P_{wn,c,pp-wn,n-wn,e}^{city}, \quad \forall wn, e \quad (3.3.24)$$

Beneficio económico por las ventas por el tipo de residuo wn

Para definir el beneficio por las ventas de los productos producidos a partir de cada tipo de residuo wn se utilizó la ecuación de (3.3.25), donde la sumatoria de los costos unitarios de cada tipo de producto es multiplicada por la cantidad de productos producidos a partir del tipo de residuos wn , para cada escenario e .

$$C_{wn,e}^{sales} = \sum_c \sum_{pp-wn} \sum_{n-wn} P_{wn,c,pp-wn,n-wn,e}^{city} C_{wn,c,n-wn,e}^{product}, \forall wn,e \quad (3.3.25)$$

3.3.1.1 Funciones objetivo

El problema propuesto es definido con un enfoque de optimización multi-objetivo y las funciones objetivo consideradas se describen a continuación.

Beneficio Económico Neto Total

El beneficio económico neto es igual al beneficio económico por las ventas de los productos, menos el costo de separación de los residuos, menos el costo de operación, menos el costo de transporte de los residuos a las plantas de procesamiento y menos el coste de transporte de los productos hacia las ciudades donde serán consumidos, para cada escenario e.

$$\begin{aligned} ONetProfit_e = & C_e^{sales} - CostSep_e^{total} - CostCap_e^{total} - CostOp_e^{procesing} \\ & - CostTransp_e^{pp\ city} - CostTransp_e^{city\ pp} - CostNSep_e^{total} \end{aligned} \quad (3.3.26)$$

Residuos reutilizados totales

El porcentaje total de residuos consumidos ($TotalConsume^{waste}$), es igual a la relación entre la cantidad de residuos que se reutilizan $\sum_{wn \in W} \sum_{c \in C} F_{wn,c,e}$, entre, la parte de los residuos que se pueden aprovechar ($\sum_{wn \in W} \sum_{c \in C} \sum_{p-wn \in S} \alpha_{wn,c,p-wn}^{sep} F_{c,p-wn}^{total}$), como se muestra en la ecuación (3.3.27), para cada escenario e.

$$TotalConsume_e^{waste} = 100 \frac{\sum_{wn \in W} \sum_{c \in C} F_{wn,c,e}}{\sum_{wn \in W} \sum_{c \in C} \alpha_{wn,c}^{sep} F_{wn,c,e}^{total}}, \forall e \quad (3.3.27)$$

Beneficio económico neto por tipo de residuo

La función objetivo para el beneficio económico neto por tipo de residuo wn es igual el beneficio obtenido por las ventas de los productos producidos con el tipo de residuos wn , menos el costo de separación, el costo de operación, costo de capital por tipo de residuo

wn y menos e coste de transporte de los productos a las ciudades, para cada escenario e.

$$\begin{aligned} Profit_{wn,e} = & C_{wn,e}^{sales} - CostSep_{wn,e} - CostOp_{wn,e}^{procesing} \\ & - CostCap_{wn,pp-wn,n-wn,e}^{procesing} - CostTranp_{wn,e}^{city,pp}, \forall wn,e \end{aligned} \quad (3.3.28)$$

Finalmente, la función objetivo que considera los gastos del gobierno es igual al costo de transporte para recolectar los residuos de las ciudades y llevarlos hasta las plantas de procesamiento, menos el costo total por no separar los residuos, para cada escenario e.

$$Government\ expenditure_e = CostTransp_e^{city,pp} - CostNSep_e^{total} \quad (3.3.29)$$

3.3.1.2 Escenarios optimista, promedio y pesimista bajo incertidumbre

Para analizar los posibles riesgos en los tres escenarios y elucidar cuales son las probabilidades de obtener el mejor resultado, las siguientes ecuaciones son formuladas.

Escenario optimista

La función optimista para cada función objetivo obj, debe ser la función objetivo obj con el valor más grande entre las funciones objetivo obj en los diferentes escenarios e.

$$OptFunction_{obj} \geq Function_{obj,e} \quad \forall obj \quad (3.3.30)$$

Disyunción para los escenarios optimistas

Aunque en la ecuación 3.3.30 se definió la función optimista para cada función objetivo obj, es necesario limitar el valor que esta función puede tomar. Por lo cual se definió la disyunción que se muestra a continuación.

$$\left[\begin{array}{l} y_{obj,e}^{op} \\ OptFunction_{obj,e} \leq Function_{obj,e} \end{array} \right] \quad \forall obj,e$$

Esta disyunción fue implementada en el modelo con las ecuaciones 3.3.31, 3.3.32 y 3.3.33. La ecuación 3.3.31 dicta que solo puede existir una variable binaria para cada función objetivo obj.

$$\sum_e y_{obj,e}^{op} = 1 \quad \forall obj \quad (3.3.31)$$

Además, la ecuación 3.3.32 expresa que si el valor de la variable binaria vale 0 entonces la función optimista será siempre menor que el lado derecho de la ecuación. Por lo que el parámetro $OptF^{max}$ es un valor lo suficientemente grande para hacer el lado derecho siempre mayor que la función optimista. De lo contrario, si la variable binaria toma el valor de 1 la ecuación 3.3.33 es activada.

$$OptFunction_{obj,e} \leq Function_{obj,e} + OptF^{max} (1 - y_{obj,e}^{op}) \quad \forall obj,e \quad (3.3.32)$$

La ecuación 5 dice que la función optimista debe ser la mayor de las funciones objetivo en los escenarios e.

$$OptFunction_{obj,e} \geq Function_{obj,e} y_{obj,e}^{op} \quad \forall obj,e \quad (3.3.33)$$

Escenario Promedio

En este caso la función promedio es la media de las funciones objetivo para los distintos escenarios e, en otras palabras la función promedio es igual a la suma de las funciones objetivo obj entre el número de escenarios.

$$MeanFunction_{obj} = \frac{\sum_e Function_{obj,e}}{card(e)} \quad \forall obj \quad (3.3.34)$$

Escenario pesimista

La función pesimista es formulada con la ecuación 3.3.35, esta describe a la función pesimista como la menor de las funciones objetivo obj generadas en cada escenario.

$$PessimisticFunction_{obj} \leq Function_{obj,e} \quad \forall obj \quad (3.3.35)$$

Funciones normalizadas

Una vez que los casos optimista, promedio y pesimista son analizados, para formular una ecuación que tome en cuenta a las diferentes partes interesadas, es importante primero normalizar las funciones en los tres casos descritos anteriormente.

Ecuación 3.3.36 describe a la función optimista normalizada que se obtiene mediante la diferencia entre el límite superior de la función optimista y la función optimista, dividida por el límite superior menos el límite inferior de la función optimista.

$$NOF_{obj} = \frac{OF_{obj}^{UB} - OptFunction_{obj}}{OF_{obj}^{UB} - OF_{obj}^{LB}} \quad \forall obj \quad (3.3.36)$$

De igual manera para la función promedio normalizada es igual a la relación entre el límite superior de la función promedio menos la función promedio y el límite superior menos el límite inferior de la función promedio (ver ecuación 3.3.37).

$$NMF_{obj} = \frac{MF_{obj}^{UB} - MeanFunction_{obj}}{MF_{obj}^{UB} - MF_{obj}^{LB}} \quad \forall obj \quad (3.3.37)$$

Análogamente, para la ecuación (3.3.38) la función pesimista normalizada es igual a la diferencia entre el límite superior de la función pesimista y la función promedio, entre la diferencia entre el límite superior menos el límite inferior de la función pesimista.

$$NPF_{obj} = \frac{PF_{obj}^{UB} - PessimisticFunction_{obj}}{PF_{obj}^{UB} - PF_{obj}^{LB}} \quad \forall obj \quad (3.3.38)$$

Solución compromiso individual

La solución compromiso individual para cada función objetivo es igual a la suma de la función optimista, promedio y pesimista normalizadas.

$$CUF_{obj} = NOF_{obj} + NMF_{obj} + NPF_{obj} \quad \forall obj \quad (3.3.39)$$

3.3.1.3 Solución compromiso total

La solución compromiso total es básicamente la suma de las soluciones compromiso individuales.

$$OCS = \sum_{obj} CUF_{obj} \quad (3.3.40)$$

Capítulo 4. Resultados

4.1 Resultados para la planificación estratégica de sistemas para el manejo de los RSU considerando a las diferentes partes interesadas

4.1.1 Escenario 1

Los resultados para el escenario 1 muestran que al maximizar el BENT el porcentaje de consumo de los RSU fue de 85.173% y entre los materiales que se tratan están el papel y los no reciclables ambos en un 100%, o sea que todo el papel y los no reciclables son tratados. Dando un BENT de 63.189\$MM/y y el costo del gobierno con un total de -12.666\$MM.

Al minimizar la SC se obtuvo un consumo del 95.021%, donde los materiales aprovechados fueron el vidrio, papel y los no reciclables. Del vidrio disponible solo se consumió el 81.5%, mientras que el papel y los no reciclables se aprovecharon al máximo con un 100% para ambos. El BENT en este caso fue de 62.842\$MM/y que es menor que en el caso anterior, sin embargo se consumió vidrio en este caso y los gastos del gobierno se redujeron a -12.570\$MM/y.

En el caso de SFP, al minimizarla se obtuvo un consumo total del 95.021% y los materiales reutilizados fueron todos menos los metales y el plástico, en cuanto el vidrio el porcentaje usado fue 81.5%, para el papel y los no reciclables de igual manera fue de 100%. El BENT en este caso fue menor que en los dos casos anteriores con un 62.725\$MM/y, sin embargo este caso fue uno en donde más variedad de productos fueron reutilizados, aunque esto no beneficio tanto a los gastos del gobierno ya que fueron de -12.578\$MM/y, un costo más alto que en los casos anteriores. (Ver **Tabla 4.1.1.1**).

Tabla 4.1.1.1 Resultados para el escenario 1

Función Objetivo/Concepto	Maximizando el BENT (\$MM/y)	Minimizando la SC (\$MM/y)	Minimizando la SCP (\$MM/y)
ONP	63.189	62.842	62.725
% RSU consumidos	85.17%	95.02%	95.02%
% Vidrio consumido	0%	81.5%	81.5%
% Papel consumido	100%	100%	100%
% No reciclables consumidos	100%	100%	100%
Beneficio económico neto del plástico	0	0	0
Beneficio económico neto del metal	0	0	0
Beneficio económico neto del vidrio	0	-0.441	-0.499
Beneficio económico neto del papel	2.327	2.326	2.274
Beneficio económico neto de los no reciclables	73.528	73.528	73.528
Gastos del gobierno	-12.666	-12.570	12.578

La distribución de los productos para cuando el BENT es maximizado se muestra en la **Figura 4.1.1.1** Los materiales reutilizados son el papel y los no reciclables, los cuales son recolectados de las cinco ciudades que se tomaron en cuenta para el caso de estudio. El papel reciclado es producido en Morelia y distribuido para su consume en las cinco ciudades. En cuanto a los no reciclables, estos son enviados a una planta ubicada en Morelia que abastece de energía eléctrica a Morelia y una parte de los no reciclables

generados en la Apatzingán son enviados a una planta de procesamiento en Apatzingán y la energía es distribuida en esa misma ciudad.

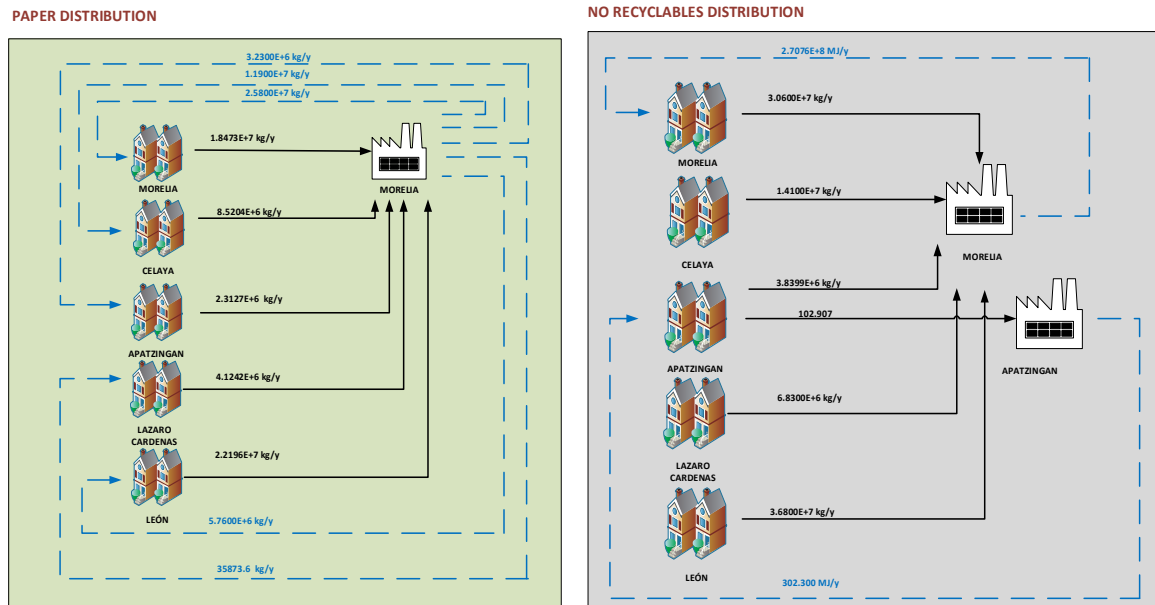


Figura 4.1.1.1 Distribución de los productos obtenidos a partir de los RSU al maximizar el BENT en el escenario 1.

La distribución de los productos que se obtuvo al minimizar la SC se muestra en la **Figura 4.1.1.2**. Los tres tipos de residuos son recolectados en las cinco ciudades consideradas en el modelo. En el caso del vidrio, solo el vidrio verde y el café son tratados, ambos en Morelia pero cada uno en una planta diferente., una vez obtenido los productos estos son consumidos en Morelia también. El papel una vez recolectado es enviado a la planta de procesamiento de Morelia y el papel reciclado es distribuido en todas las ciudades menos en Apatzingán. Los no reciclables son procesados y consumidos en León.

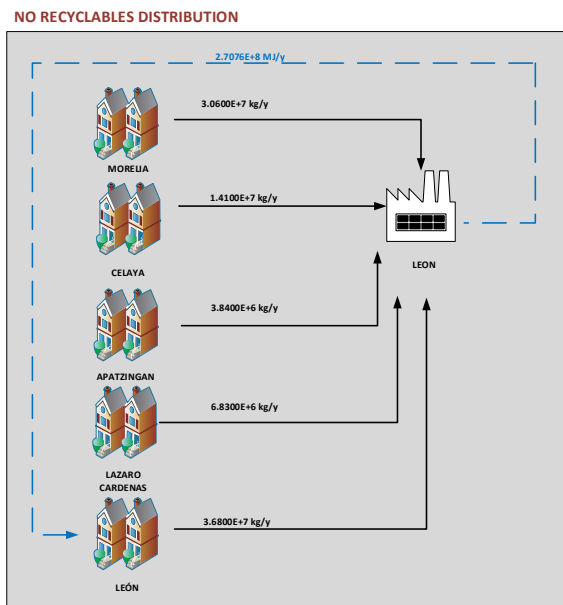
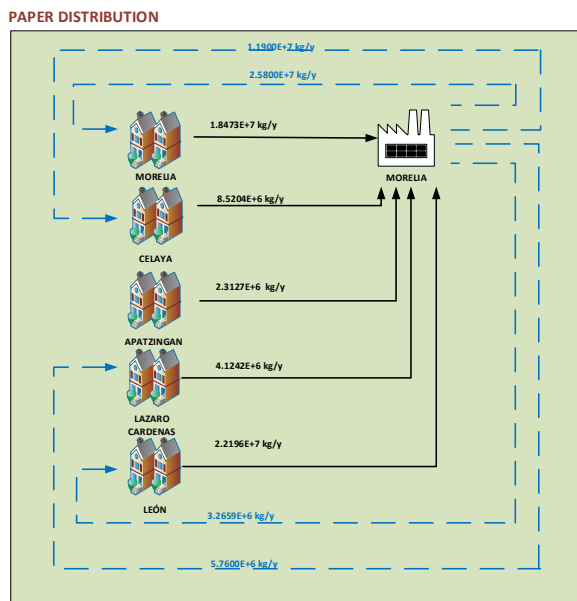
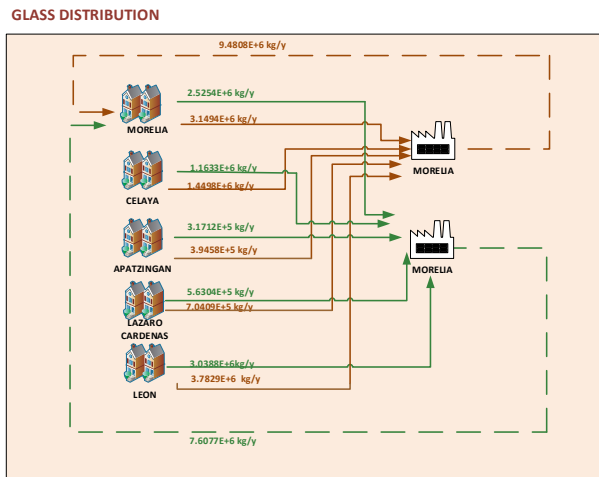


Figura. 4.1.1.2 Distribuciones de los productos obtenidos a partir de los RSU al minimizar la SC en el escenario 1.

Las distribuciones de los productos obtenidos al minimizar la SFP se muestran en la **Figura 4.1.1.3**. Los tres tipos de residuos don recolectados de las cinco ciudades considerada. Solo el vidrio verde y café es reutilizado, el vidrio café es tratado en una planta de procesamiento ubicada en Morelia y una vez obtenido los productos estos son enviados a Morelia. El vidrio verde es enviado a una planta localizada en León y los productos obtenidos se distribuyen en Lázaro Cárdenas. El papel y los no reciclables son colectados de las cinco ciudades. El papel se trata en una planta ubicada en Morelia, esta

planta distribuye sus productos en Morelia y León. Los no reciclables son enviados a la planta de procesamiento ubicada en León y la energía generada en esta es consumida en el mismo lugar.

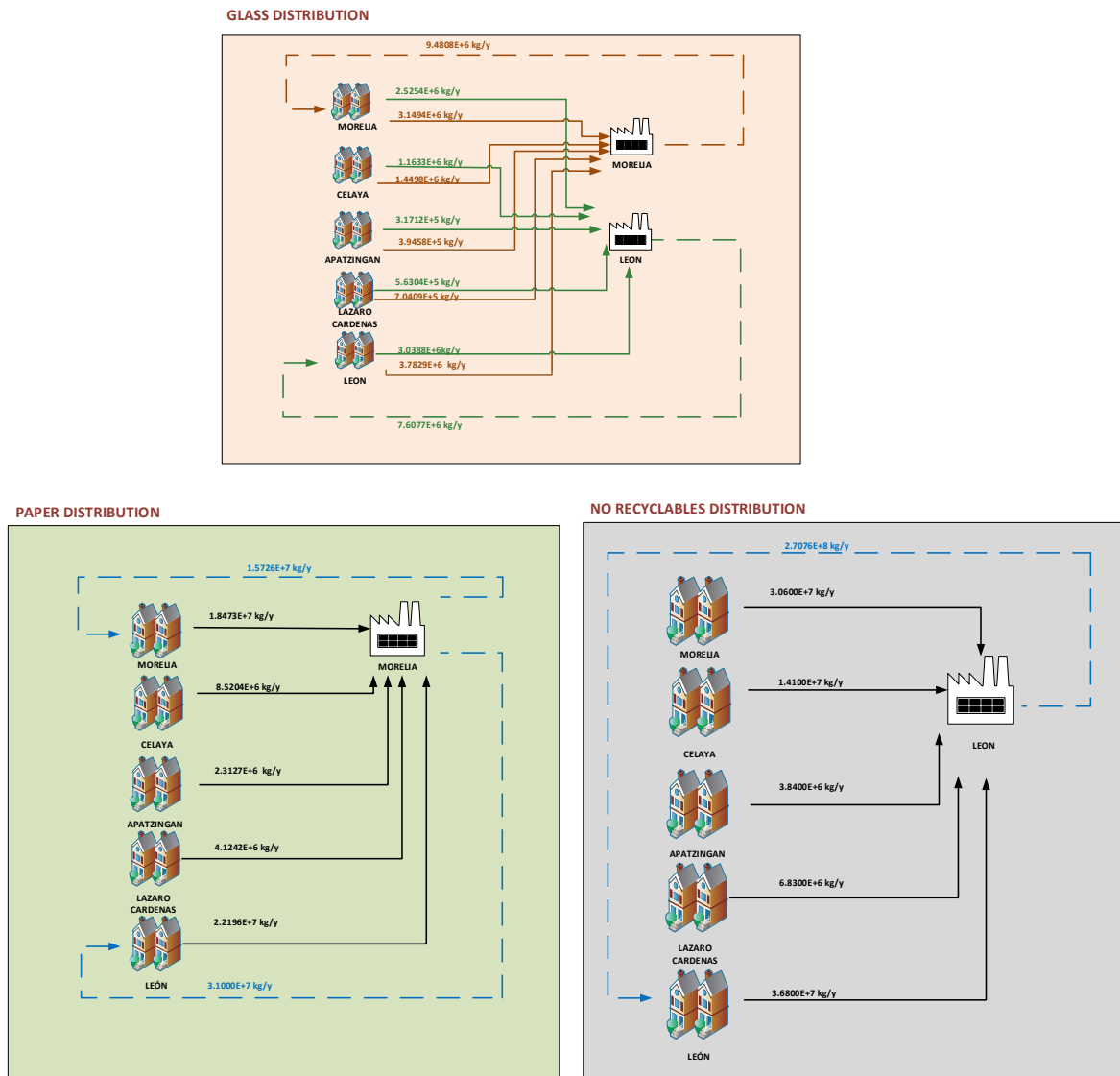


Figura 4.1.1.3 Distribución de los productos obtenidos a partir de los RSU cuando se minimiza la SFP para el escenario 1.

En la **Figura 4.1.1.4** se muestra el porcentaje para cada función objetivo lejos de su máximo individual (límite superior). Cuando el BENT es maximizado el porcentaje de RSU consumidos esta un 14.8% de su máximo individual, para los gastos del gobierno se tuvo

un porcentaje de 5.10%, usando esta estrategia fue cuando obtuvo los peores resultados. Por lo tanto para la SC y la SFP los porcentajes para el porcentaje de consumo de RSU fueron 4.94% para ambas soluciones, en cuanto a los gastos del gobierno los porcentajes fueron de 4.31 y 4.37%, respectivamente. Los porcentajes para el resto de las funciones objetivo fueron despreciables, excepto para el beneficio económico neto del papel con un 2.8%, cuando la SFP fue minimizada

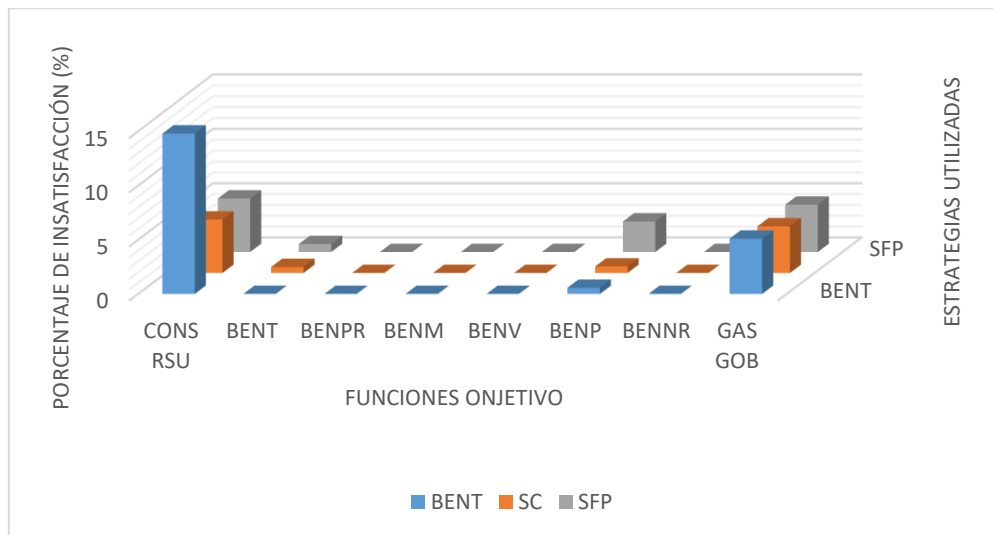


Figure 4.1.1.4. Porcentaje para cada función objetivo lejos de su máximo individual para las tres estrategias de optimización en el primer escenario.

4.1.2 Escenario 2

En el escenario 2 la principal suposición radica en que los costos de separación serán cubiertos por el gobierno. En la Tabla 4.1.2.1 se muestran los valores de las diferentes funciones objetivo generadas al maximizar el BENT y minimizar la SC y la SFP. Analizando el caso cuando el BENT es maximizado tenemos un consumo total de RSU de 85.685%, los principales tipos de residuos reutilizados fueron los metales, el papel y los no reciclables, de los cuales se utilizó el 100% de los tres residuos disponible para ser reusado. El BENT que se obtuvo fue de 69.407\$MM/y y los gastos del gobierno ascendieron a -17.298\$MM/y.

Los resultados generados al minimizar la SC muestran un consumo total de RSU de 95.533%, siendo los metales, el vidrio, el papel y los no reciclables los materiales reutilizados. De todos estos materiales se consumió el 100% a excepción del vidrio cuyo porcentaje fue de 45.217%. Aunque en este caso el porcentaje de consumo de residuos fue mayor, esto no es reflejado en el BENT ya que fue menor que en el caso anterior, siendo este de 68.158\$MM/y, esto se debe a que el vidrio es reutilizado pero no genera ganancias. El costo del gobierno también resultó ser mayor esto como consecuencia del aumento en el porcentaje de RSU consumido, ya que el gobierno absorbe los gastos de separación.

Al minimizar la SFP se obtuvo un consumo de RSU del 87.921%, un porcentaje menor que en caso anterior, pero mayor que en el primer caso. Los materiales reutilizados fueron los metales, el vidrio, el papel y los no reciclables. El porcentaje de vidrio reusado fue de 18.5% y siendo el resto de los materiales consumidos al 100%. Aunque el consumo fue menor que en el caso anterior, el BENT aumento a 68.991\$MM/y, pese a que este valor no es mayor que en el primer caso, es importante notar que hay un mayor consumo de RSU. Sin embargo, los gastos del gobierno parecen ser los más grandes de los tres con -17.339\$MM/y (ver Tabla 12.2.1)

Tabla 4.1.2.1 Resultados para el escenario 2

Función Objetivo/Concepto	Maximizando el BENT (\$MM/y)	Minimizando la SC (\$MM/y)	Minimizando la SCP (\$MM/y)
BENT	69.407	68.158	68.991
% RSU consumidos	85.685%	95.533%	87.921%
%Metal consumido	100%	100%	100%
%Vidrio consumido	100%	100%	100%
%Papel consumido	0%	81.5%	18.5%
%No reciclables consumidos	100%	100%	100%
Beneficio económico neto del plástico	0	0	0
Beneficio económico neto del metal	1.729	1.730	1.727
Beneficio económico neto del vidrio	0	-0.306	-0.319
Beneficio económico neto del papel	9.052	9.046	8.998
Beneficio económico neto de los no reciclables	75.924	75.004	75.924
Gastos del gobierno	-17.298	-17.317	-17.339

La distribución de los productos elaborados a partir de los residuos al maximizar el BENT se ilustran en la **Figura 4.1.2.1** Los tres tipos de residuos son recolectados de las cinco ciudades tomadas en cuenta para el modelo. Los metales son enviados a una planta de procesamiento ubicada en Morelia, una vez obtenido el metal reciclado, es distribuido en Morelia y Lázaro Cárdenas. El papel también es procesado en Morelia y el papel listo

para ser usado es enviado a cada una de las ciudades. Los no reciclables son tratados en una planta localizada en Morelia y la energía producida es consumida en Morelia.

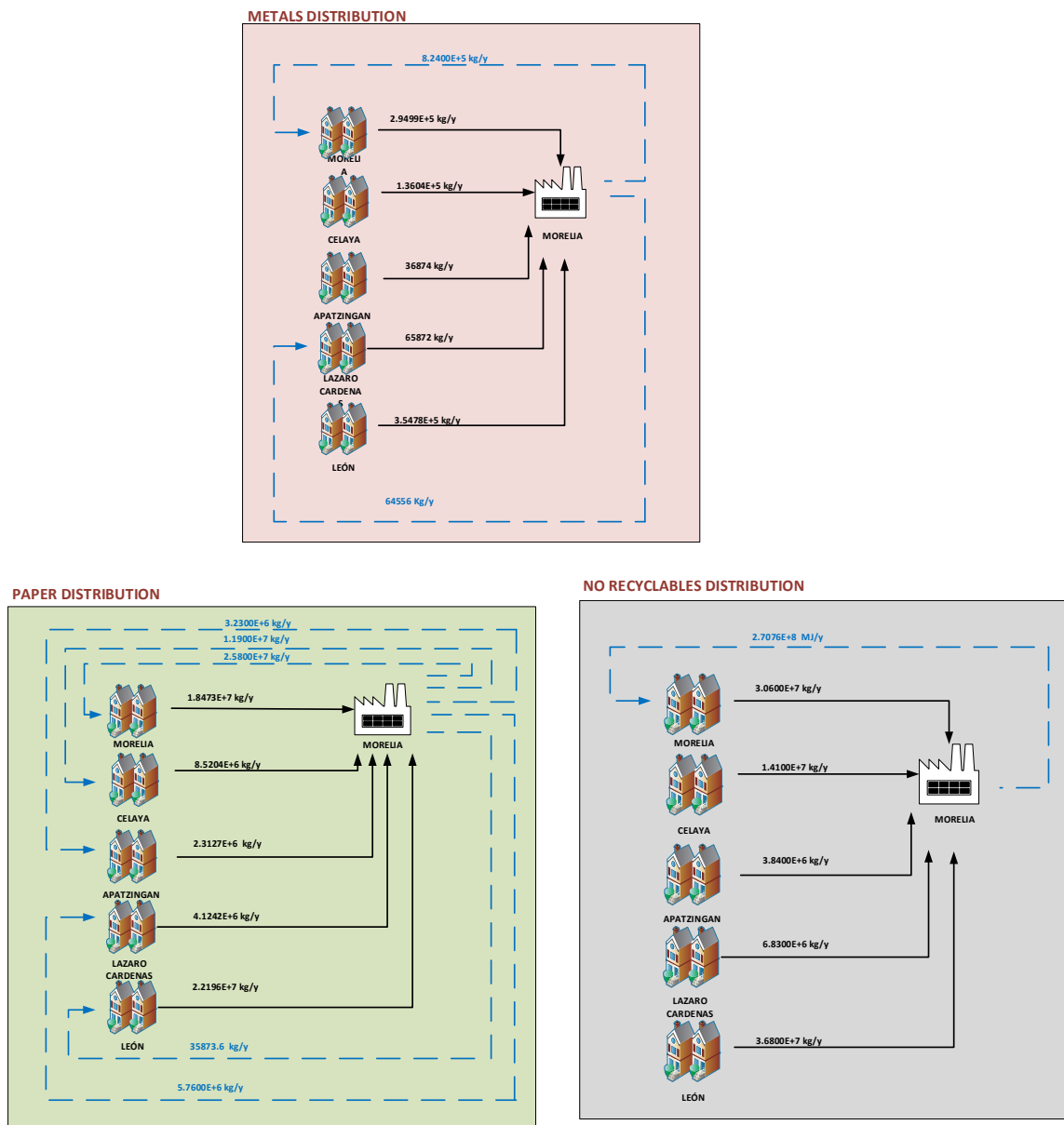


Figura 4.1.2.1 Distribución de los productos obtenidos de los RSU al maximizar el BENT en el escenario 2.

La distribución obtenida cuando se minimiza la SC se muestra en la **Figura 4.1.2.2** Aquí los todos los residuos que se van a reutilizar son recolectados de las 5 ciudades consideradas. Los metales son enviados a la planta de procesamiento en León y después

los metales listos para ser consumidos en la misma ciudad. En cuanto al vidrio, solo dos tipos de vidrio son reciclados, el verde y el café. El vidrio verde es tratado en una planta ubicada en Morelia y los productos elaborados a partir de este son distribuidos en Morelia. El vidrio café es enviado a una planta en León y de igual manera los productos son consumidos en la misma ciudad. El papel es reciclado en una planta en Morelia y el papel listo para ser consumido es distribuido en todas las ciudades consideradas, menos en Lázaro Cárdenas. Los no reciclables son tratados en una planta localizada en Lázaro Cárdenas y la energía generada es distribuida en León.

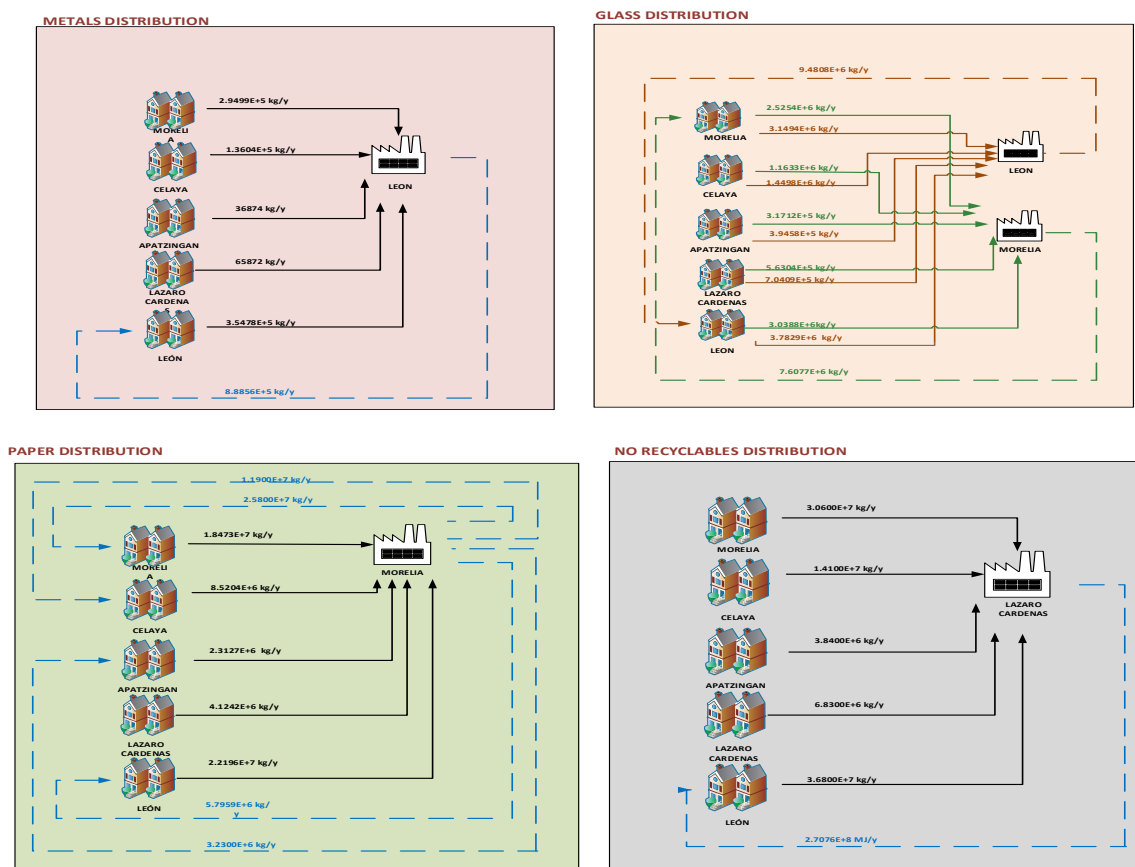


Figura 4.1.2.2 Distribución de los productos obtenidos de los RSU al minimizar la SC en el escenario 2.

La distribución de los productos para el último caso donde se minimiza la SFP se muestra en la **Figura 4.1.2.3** los cuatro tipos de residuos son recolectados de las cinco ciudades tomadas en cuenta. Los metales son procesados en una planta en Morelia y los productos obtenidos son mandados a Morelia, Celaya y Apatzingán. Solo el vidrio claro es reciclado

en una planta localizada en Morelia y los productos distribuidos en León. En cuanto a los no reciclables, estos son tratados en una planta de procesamiento en Apatzingán y la energía generada es distribuida en Celaya.

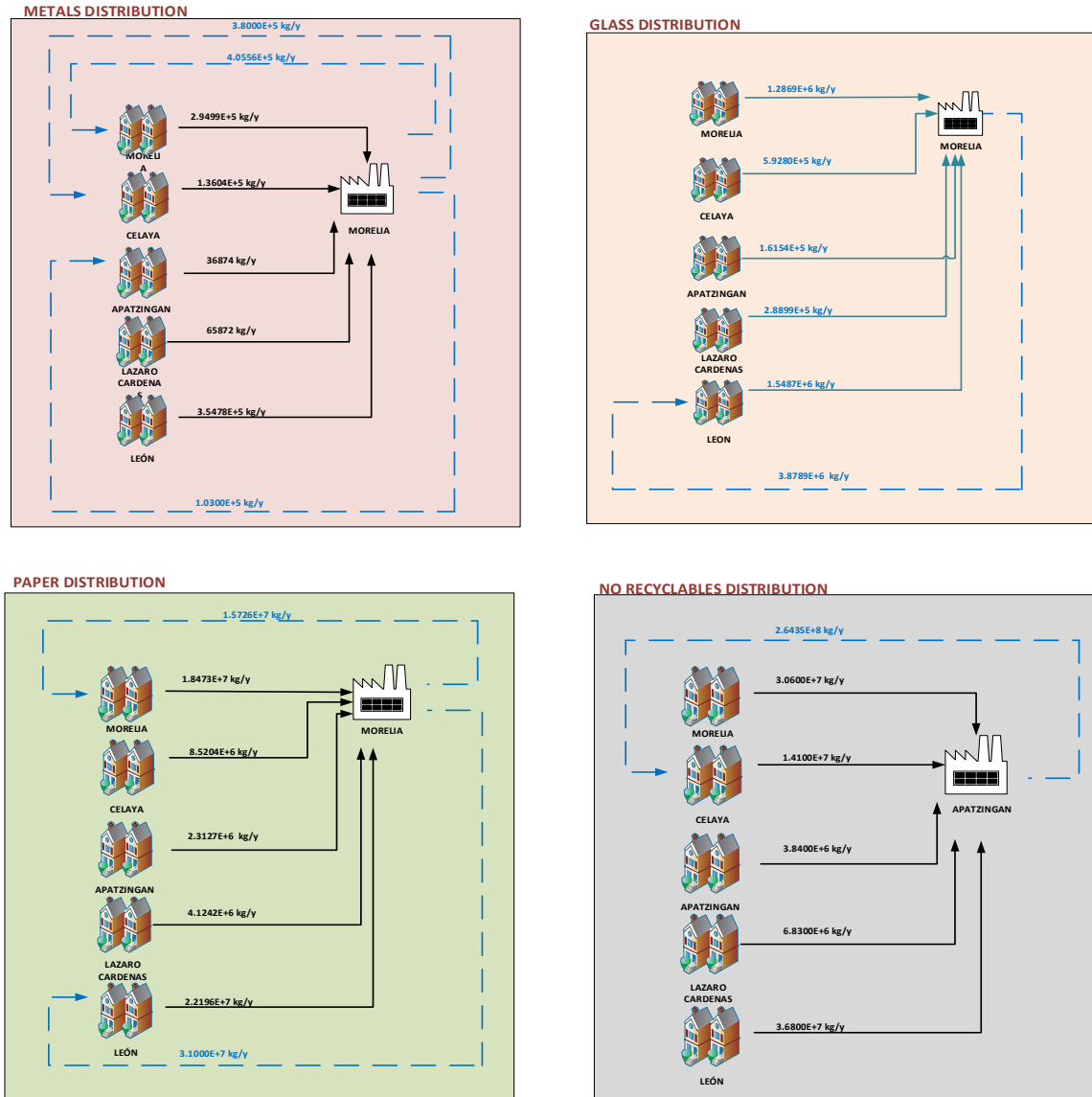


Figura 4.1.2.3 Distribución de los productos obtenidos de los RSU al minimizar la SFP en el escenario 2.

Los porcentajes para cada función objetivo lejos de su máximo individual se muestran en la **Figura 4.1.2.4** Para el porcentaje de RSU consumidos cuando el BENT fue maximizado se obtuvo un porcentaje de 14.2% y en la función objetivo de los gastos del gobierno se obtuvo un porcentaje de 22.7%. En el caso donde la SC fue minimizada, las principales

funciones objetivo para las cuales se obtuvo un porcentaje lejos de su máximo individual fueron: el porcentaje de consumo de RSU, el BENT, el beneficio económico de los no reciclables y los gastos del gobierno con los correspondientes porcentajes de 4.4%, 1.8%, 1.2% y 22.8%. En cuanto a la solución obtenida cuando la SFP fue minimizada, esta resultó muy similar al caso donde el BENT es maximizado. Los porcentajes obtenidos para el porcentaje de RSU consumidos y para los gastos del gobierno fueron 12% y 22.9% respectivamente. El mejor resultado fue obtenido con la segunda estrategia (minimizando la SC) y aunque en este caso hay más funciones que muestran un porcentaje lejos de sus máximos individuales, el porcentaje del por ciento de consumo de RSU es menor que el obtenido en las otras estrategias. Además, gran parte de las funciones objetivo están más cerca de sus máximos individuales que en las otras alternativas.

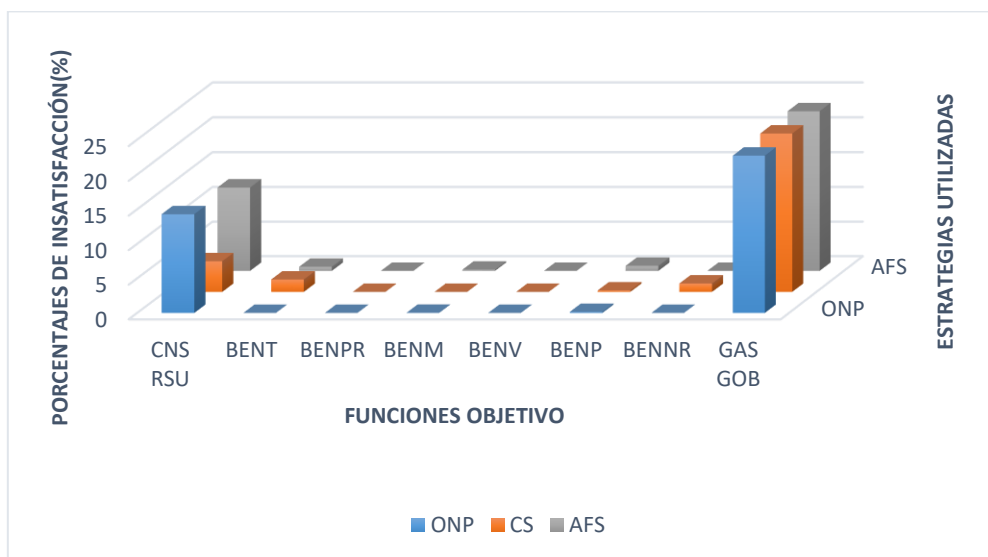


Figure 4.1.2.4 Porcentaje para cada función objetivo lejos de su máximo individual para las tres estrategias de optimización en el segundo escenario.

4.1.3 Escenario 3

En el escenario 3 la principal suposición es que la separación de los residuos se da en las casas y establecimientos donde se producen, por lo que se elimina el costo de separación. Analizando el primer caso donde el BENT es maximizado se tiene un consumo total de RSU de 85.685%, los materiales reutilizados son los metales, el papel y los no reciclables. De los tres se consumió el 100% de los residuos disponibles. El BENT aumentó a 74.047\$MM/y y los gastos del gobierno disminuyeron a -12.659\$MM/y.

Cuando la SC es minimizada el consumo total aumento a 95.533% y los materiales reutilizados en este caso fueron los metales, el vidrio, el papel y los no reciclables.

El porcentaje utilizado de cada una de los residuos disponibles fue de 100%, 81.5%, 100% y 100%, respectivamente. Con esto se obtuvo un BENT de 73.861\$MM/y que es un poco más bajo que en el caso anterior, sin embargo en este caso se consumió aproximadamente 10% más del total de RSU. Los gastos del gobierno disminuyeron a -12.533\$MM/y, esto porque se reduce la cantidad de residuos que se va mandar a un relleno sanitario.

Para el tercer caso cuando se minimiza la SFP se tiene una solución muy similar a la del caso anterior, con un consumo total de 95.533%, siendo los metales, el vidrio, el papel y los no reciclables los principales residuos reusados. El porcentaje consumido fue igual que en caso anterior 100% para todos con excepción del vidrio con un 81.5%. No obstante, el beneficio económico neto de cada tipo de residuo difiere un poco por la distribución de los productos y localización de las plantas. El BENT fue el menor de los tres casos con 73.819\$MM/a y los gastos del gobierno fueron iguales al caso anterior con -12.533\$MM/y (ver **Tabla 4.1.3.1**)

Tabla 4.1.3.1 Resultados para el escenario 3

Función Objetivo/Concepto	Maximizando el BENT (\$MM/y)	Minimizando la SC (\$MM/y)	Minimizando la SCP (\$MM/y)
BENT	74.047	73.861	73.819
% RSU consumidos totales	85.685	95.533	95.533
Beneficio Económico Neto de los plásticos	0	0	0
Beneficio Económico Neto de los metales	1.729	1.729	1.724
Beneficio Económico Neto del vidrio	0	-0.304	-0.348
Beneficio Económico Neto de los papel	9.052	9.045	9.052
Beneficio Económico Neto de los no reciclables	75.924	75.924	75.924
Gastos del Gobierno	-12.659	-12.533	-12.533

En el primer caso cuando se maximiza el BENT, la distribución de los productos es mostrada en la **Figura 4.1.3.1** los tres tipos de residuos son recolectados de las cinco ciudades. Los metales son procesados en una planta ubicada en Morelia y los metales listos para ser consumidos son enviados a Morelia y Lázaro Cárdenas. El papel es tratado en una planta de procesamiento en Morelia, el papel reciclado y listo para usarse es enviado a cada una de las ciudades consideradas. Los no reciclables son procesados en una planta ubicada en Morelia y la energía eléctrica producida es distribuida en Morelia y Celaya.

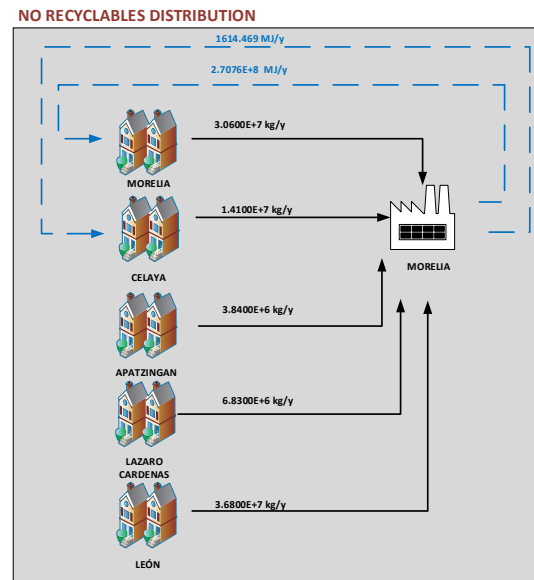
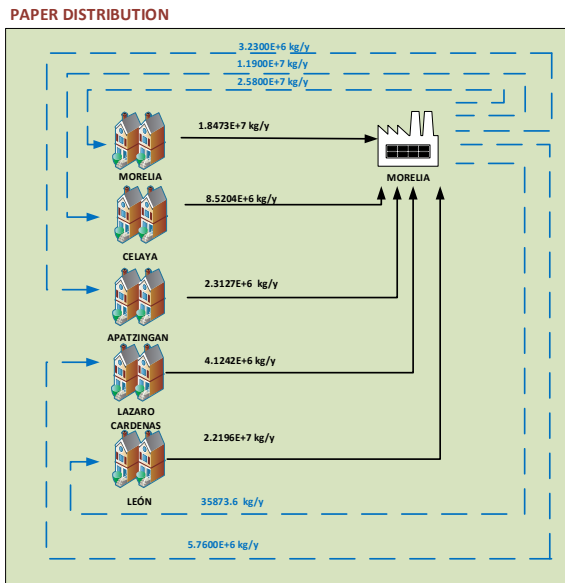
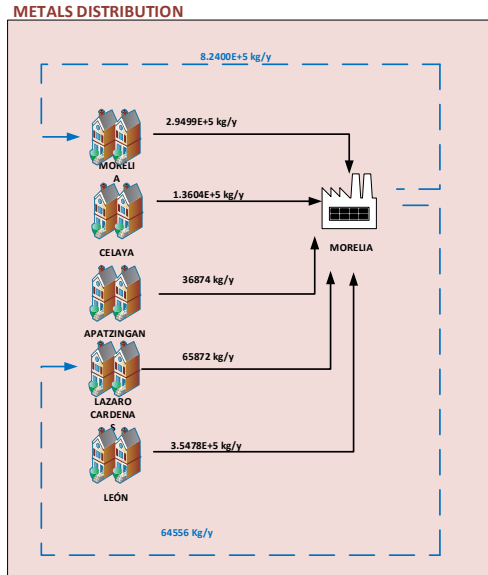


Figura 4.1.3.1 Distribución de los productos obtenidos de los RSU al maximizar el BENT en el escenario 3.

En el segundo caso, la SC es minimizada dando la distribución de los productos que se muestra en la **Figura 4.1.3.2** Los cuatro tipos de RSU son recolectados de las cinco ciudades tomadas en cuenta para el trabajo. Los metales son enviados a la planta de procesamiento en León y una vez elaborados los productos, son consumidos en la misma ciudad. En cuando al vidrio, solo el vidrio verde y café es reciclado, ambos son tratados en plantas de procesamiento ubicadas en Morelia, una planta para cada tipo de vidrio y los productos elaborados en las 2 plantas son consumidos en Morelia.

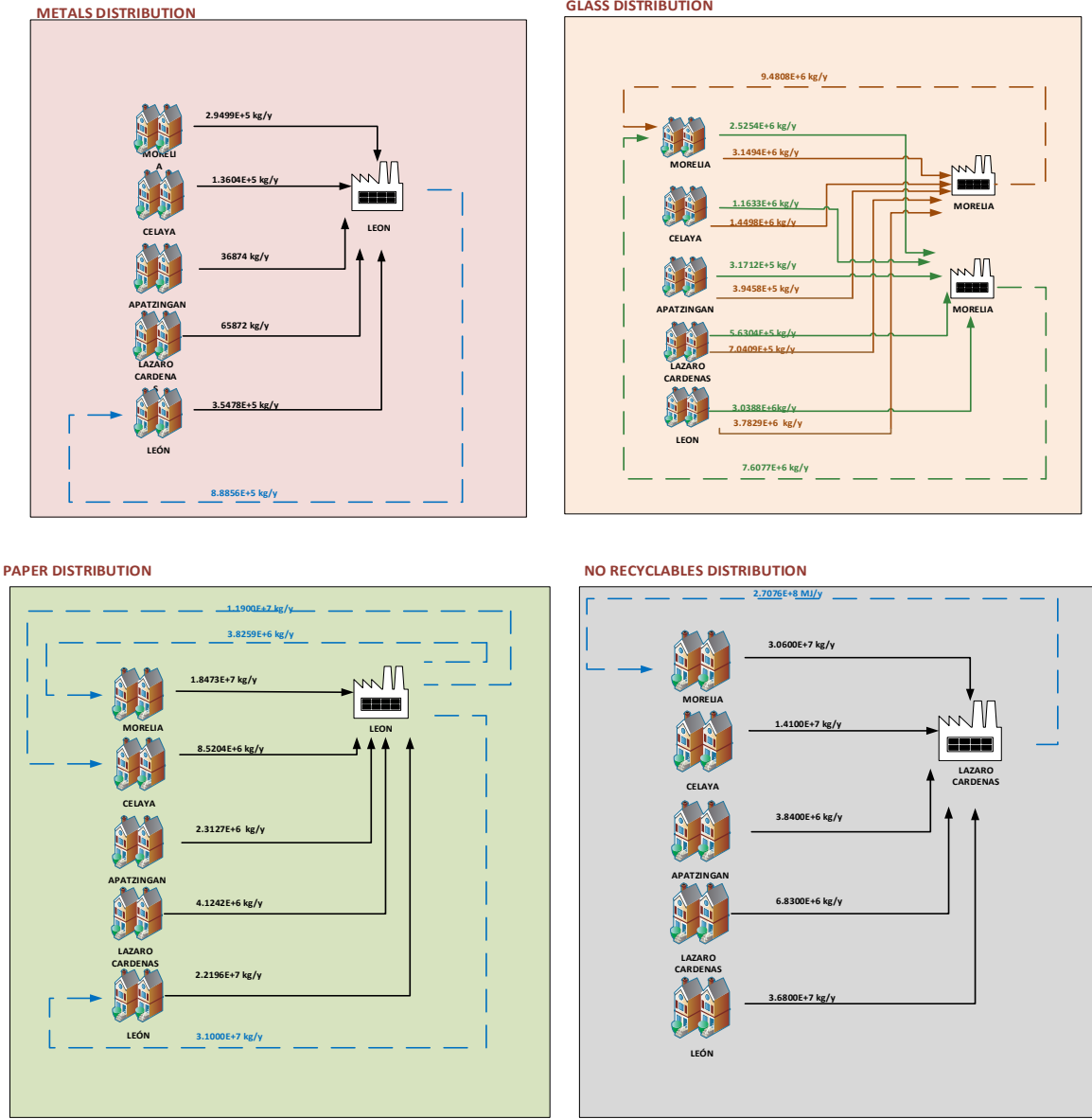
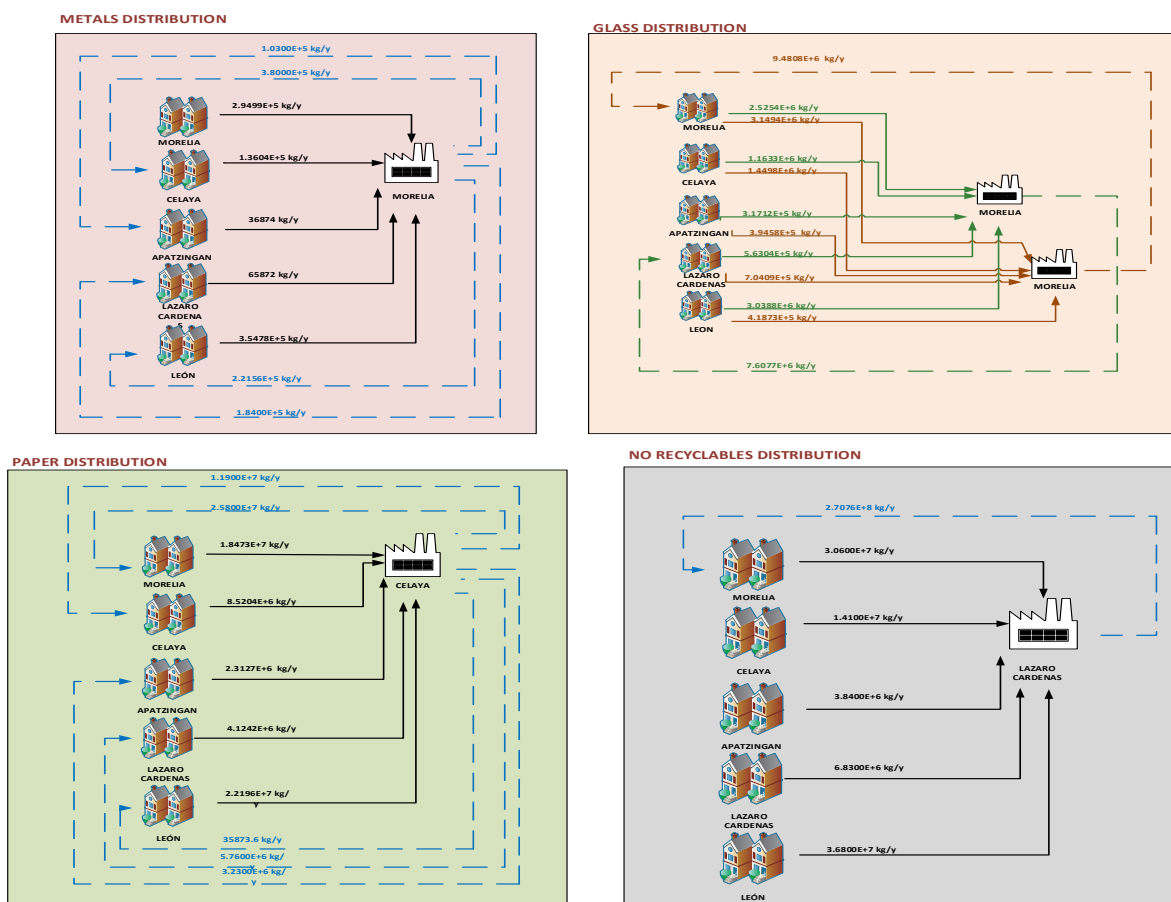


Figura 4.1.3.2 Distribución de los productos obtenidos de los RSU al minimizar la SC

Por último la distribución obtenida cuando la SFP es minimizada se muestra en la **Figura 4.1.3.3**. Aquí al igual que en los casos anteriores, los RSU sin colectados de las cinco ciudades consideradas. Los metales son enviados a la una planta ubicada Morelia y una vez tratados, son enviados para ser consumidos en Celaya, Apatzingán, Lázaro Cárdenas y León. En cuando al vidrio, únicamente el vidrio verde y café son reciclados en Morelia, cada uno en una planta de procesamiento diferente y los productos obtenidos a partir del vidrio verde son consumidos en Lázaro Cárdena y los productos elaborados a partir del vidrio café son consumidos en Morelia. El papel es procesado en una planta ubicada en Celaya y el papel reciclado listo para ser consumido es distribuido en las 5 ciudades tomadas en cuenta. Los no reciclables son tratados en una planta de procesamiento en Lázaro Cárdenas y la energía eléctrica producida es distribuida en Morelia.



3Figura 4.1.3.3 Distribución de los productos obtenidos de los RSU al minimizar la SC

Los porcentajes para cada función objetivo lejos de su máximo individual se muestran en la **Figura 4.1.3.4**. Para la primera estrategia, cuando el BENT es maximizado el porcentaje de RSU consumidos y para los gastos del gobierno los porcentajes obtenidos fueron de 14.3% y 28.5% respectivamente. Para la segunda estrategia, cuando la SC fue minimizada el porcentaje para el consumo de RSU fue de 4.4%, para el beneficio económico del vidrio fue de 5.6% y para los gastos del gobierno fue de 22.6%. Para la tercera estrategia, cuando la SFP es minimizada los porcentajes obtenidos fueron de 4.4%, 6.4% y 22.6% para el porcentaje de consumo, el beneficio económico neto del vidrio y para los gastos del gobierno respectivamente. En este escenario la segunda y tercera estrategias dan resultados similares, sin embargo, cuando la SC es minimizada el porcentaje para el beneficio neto económico del vidrio es un poco menor que cuando la SFP es minimizada.

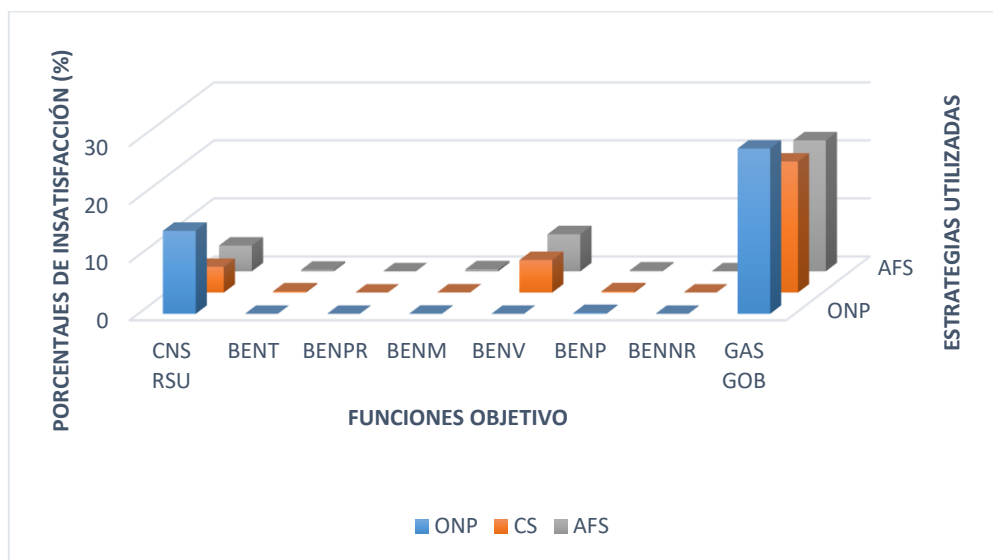


Figura 4.1.3.4 Distribución de los productos obtenidos de los RSU al minimizar la SC

4.2 Resultados para la planificación estratégica de sistemas para el manejo de los RSU bajo incertidumbre, considerando a las diferentes partes interesadas

Se analizaron los casos optimista, promedio y pesimista en la planificación de la cadena de suministros para los RSU, para las distintas funciones objetivo consideradas en el modelo anterior que considera la incertidumbre con tres diferentes desviaciones estándar ($\sigma=0.05, 0.1$ y 0.2).

En la Figura X. se muestran los resultados obtenidos cuando se analizaron estos casos para la función objetivo del BENT. Las líneas O1, M1 y W1 son obtenidas al maximizar el caso optimista, promedio y pesimista para el BENT, respectivamente con una desviación estándar de 0.05. Análogamente, las líneas O2, M2 y W2, así como las líneas O3, M3 y W3, pero con desviaciones estándar de 0.1 y 0.2 correspondientemente.

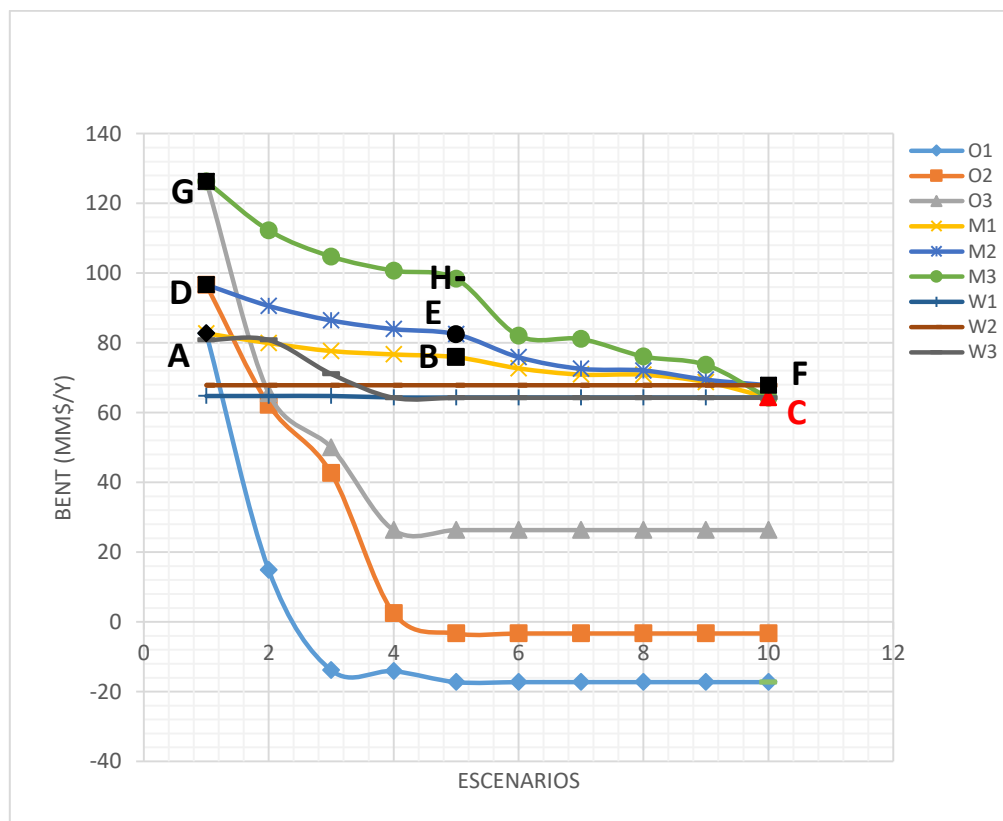


Figure 4.2.1 Casos optimista, promedio y pesimista con diferentes desviaciones estándar ($\sigma=0.05, 0.1, 0.2$), cuando el BENT fue maximizado.

Los resultados conseguidos para el caso optimista, promedio y pesimista con $\sigma=0.05$, corresponden a las líneas O1, M1 y W1. El punto A, con un valor de 82.72 \$MM/a es el valor más alto que toma la línea optimista O1, que es el escenario que tiene menos posibilidades de ocurrir entre los demás escenarios. El punto B con 75.89\$MM/a es uno de los valores que toma la línea M1, que se encuentra entre la línea O1 y W1 como es esperado para la maximización del promedio. Por consiguiente el punto C, con un valor de 6435\$MM/a es obtenido cuando el caso pesimista es maximizado. Esto quiere decir que este escenario es el más probable, aunque sea peor que los escenarios anteriores (punto A y B). Además, es importante notar que el punto W1 es mejor que la mayoría de los escenarios para el caso optimista, incluso cuando este es el peor de los escenarios pesimistas (ver **Fig. 4.2.1**).

Básicamente, los escenarios cuando la desviación estándar fue 0.1 y 0.2, para los casos optimista, promedio y pesimista siguen la misma tendencia que cuando la desviación estándar fue 0.05. Una de las principales diferencias entre los casos donde $\sigma=0.1$ y 0.2 y $\sigma=0.05$ radica en que, a medida que la sigma incrementa el valor del BENT aumenta, para cada escenario. La otra diferencia se encuentra en la línea W3, que no sigue la misma tendencia que las líneas W1 y W2. Adicionalmente, la línea W3 desde el escenario 4 empieza a tener una tendencia similar que W1. Ahora bien, el punto D fue de 96.67\$MM/a y el punto G de 26.31\$MM/a, estos representan los mayores valores optimistas para las líneas O2 y O3, respectivamente. Mientras que el punto E y H son ejemplos de escenarios para las líneas promedio M1 y M2, con valores de 8247 y 9837\$MM/a correspondientemente. Por último, los puntos F y C con valores de 67.85\$MM/a representa los peores casos pesimistas para las líneas W2 y W3 (ver **Fig. 4.2.1**).

El porcentaje total de RSU consumidos fue examinado de igual manera para los casos optimista, promedio y pesimista. En la **Figura 4.2.2** se muestran los resultados obtenidos para las tres desviaciones estándar consideradas. Analizando detalladamente la **Figura 4.2.2**, podemos ver que en el punto A se alcanza el mayor porcentaje de RSU consumidos con 99.9% para las tres σ 's. Enseguida, analizando el punto B que es obtenido para un escenario del caso promedio ($\sigma=0.05$), las líneas optimista y promedio se juntan, por lo

que hay mayor posibilidad de tener un porcentaje de entre 60 y 63%. El punto C, con un valor de 34% es el menor porcentaje obtenido para $\sigma=0.05$. Además, es interesante notar que la línea O1 está siempre por encima de la línea W1, esto quiere decir que en todos los escenarios para el caso optimista siempre obtendremos un mejor consumo que para el caso pesimista. En otras palabras hay más probabilidad de obtener un buen porcentaje de total de RSU reutilizados que uno malo.

Al estudiar los casos cuando $\sigma=0.1$, las líneas muestran un cambio drástico especialmente la línea W2 (caso pesimista) que está por encima de las líneas O2 y M2 (casos optimista y promedio correspondientemente). Por lo que hay más probabilidades de obtener un gran porcentaje de reúso que en los demás casos. En cuanto al punto E con un porcentaje de 68, es el más bajo valor obtenido para el caso pesimista y el único punto peor que uno de los escenarios para el caso promedio. Como consecuencia de lo mencionado anteriormente, la línea optimista O2 tiende a estar por debajo del caso promedio (M2). Por último, el punto D con 73.8% de porcentaje de reúso es uno de los escenarios para el caso promedio que es similar al caso pesimista. Mientras que el menor valor para el porcentaje total de RSU reutilizados fue el punto G con 47.7% para el caso promedio.

Al analizar los tres diferentes casos cuando $\sigma=0.2$, la línea optimista O3 está por encima de las líneas promedio y pesimista (M3 y W3). El punto A, muestra el mayor valor para el caso optimista, en esta línea solo uno de los escenarios tiene a decrecer drásticamente. E cuanto a la línea W3 (caso pesimista), ésta tiende a estar por encima de la línea M3 (caso promedio) para la mayoría de los escenarios, como el punto F con 87.8%

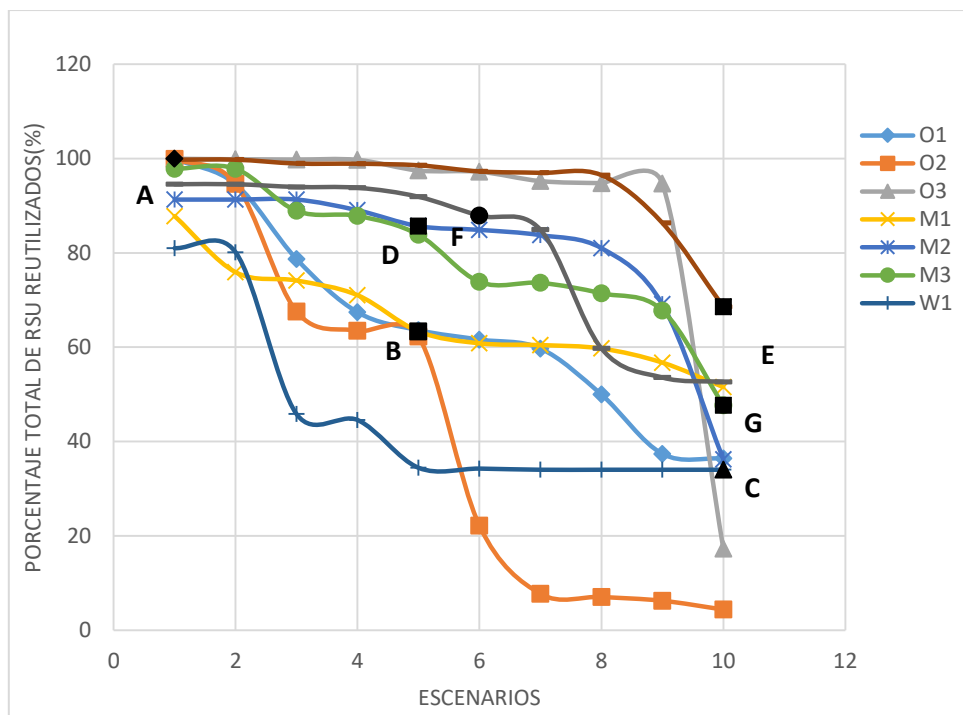


Figure 4.2.2 Casos optimista, promedio y pesimista con diferentes desviaciones estándar ($\sigma=0.05, 0.1, 0.2$), cuando el porcentaje total de RSU reciclados fue maximizado.

Al examinar la función objetivo para el beneficio neto de los metales considerando las tres diferentes desviaciones estándar. La **Figura 4.2.3**, muestra como ésta función objetivo se comporta con $\sigma=0.05, 0.1$ y 0.2 . El punto A es el beneficio neto para los metales para el caso optimista cuando $\sigma=0.05$, con un valor de $1.93\$MM/a$. Las líneas M1 y W1 tienden a juntarse desde el punto B, que tiene un valor de $1.79\$MM/a$. La línea para el caso pesimista siempre toma el mismo valor de $\$1.75MM/a$. Aquí es importante notar que este valor no está tan alejado del punto A, por lo que tal vez no valga la pena tomar riesgo para el inversionista ya que el mejor beneficio que puede alcanzar no está muy alejado del que obtendrá sin tomar ningún riesgo.

Las líneas O2, M2 y W2 siguen la misma tendencia que las líneas O1, M1 y W1, respectivamente. La única diferencia son los valores que toman, por ejemplo, el más alto valor para la línea O2 es el punto C con $\$2.16MM/a$. El punto D con $\$1.88MM/a$ y el punto E con $\$1.79MM/a$ para las el caso promedio y pesimista correspondientemente.

Básicamente, para las líneas M3 y W3 la tendencia es similar a las líneas para el caso promedio y pesimistas descritas anteriormente. Sin embargo, para el caso optimista, la línea O3 tiene más escenarios con beneficios económicos positivos que las líneas O1 Y O2. En cuanto a los puntos F con \$2.63MM/a, G con \$2.03MM/a y H con \$1.88MM/a, son ejemplos de algunos puntos obtenidos para el caso optimista, promedio y pesimista, respectivamente ($\sigma=0.2$).

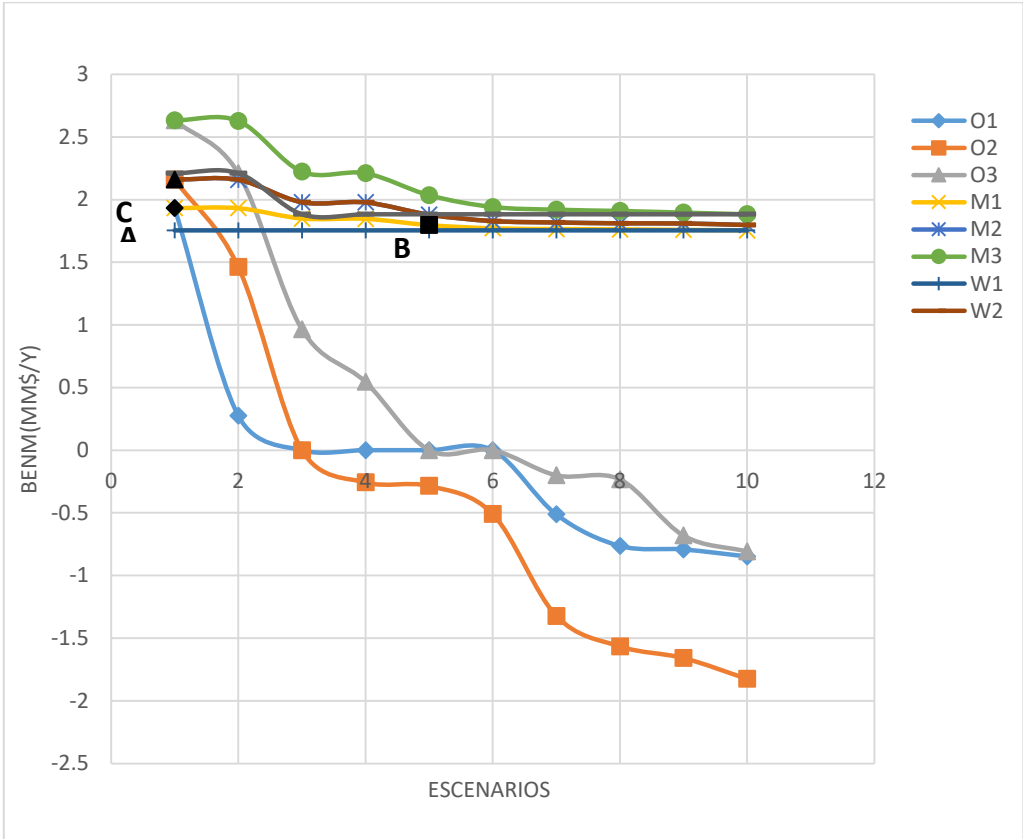


Figure 4.2.3. Casos optimista, promedio y pesimista con diferentes desviaciones estándar ($\sigma=0.05, 0.1, 0.2$), cuando el beneficio económico neto del metal es maximizado.

El beneficio económico neto del papel es analizado para los diferentes riesgos (ver **Figura 4.2.4**). Las líneas para los casos promedios (M1, M2 y M3) se encuentran por encima de las líneas optimista y pesimistas para las tres diferentes desviaciones estándar. Nuevamente, la línea optimista (O1) tiende a tener el mayor valor (\$7.39MM/a) y luego decrecer drásticamente, mientras que la línea pesimista (W1) está un poco por debajo de la promedio (M1) con un valor constante de \$6.66MM/a.

Esencialmente, el resto de las líneas con diferentes desviaciones estándar siguen la misma tendencia que las líneas mencionadas anteriormente. Una vez más, la principal diferencia es el valor que toma la función objetivo. Por ejemplo, el punto A tiene \$7.39MM/a en la línea O1, el punto B incrementa hasta \$9.06MM/a y el último punto C hasta \$10.15MM/a. El incremento en las líneas M1, M2, M3, W1, W2 y W3 es similar, como se muestra en la **Figura 4.2.4**.

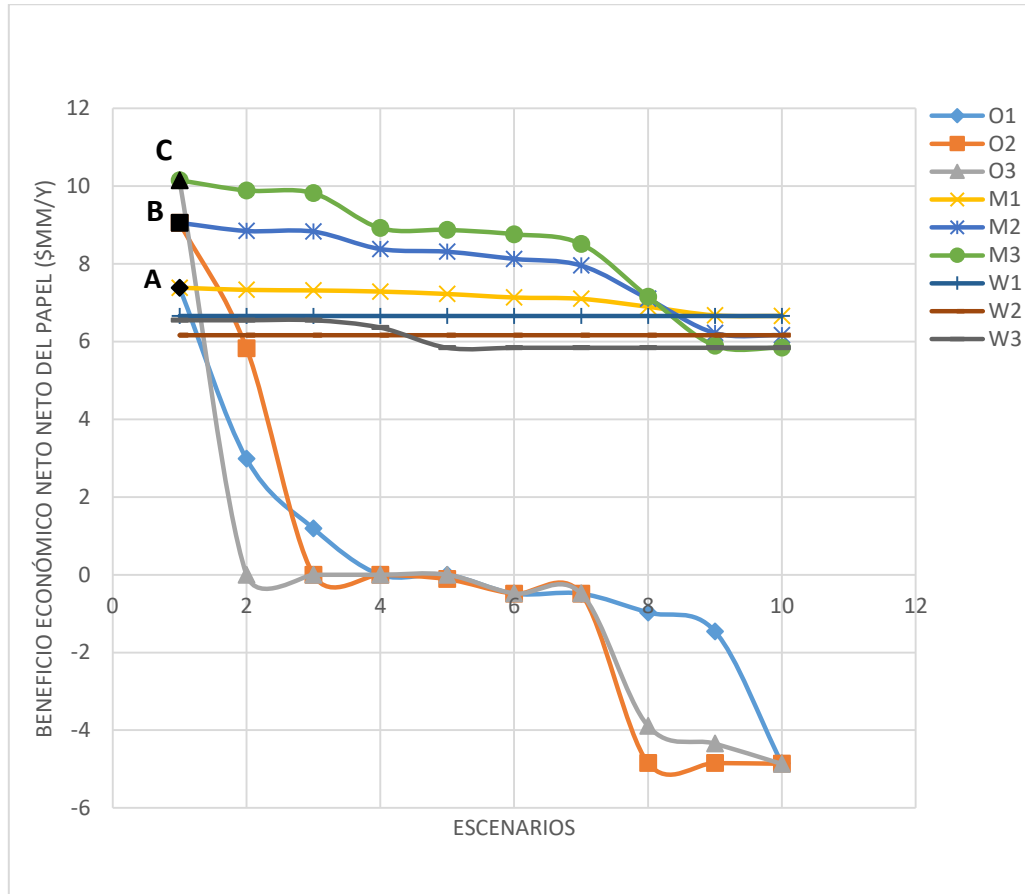


Figure 4.2.4 Casos optimista, promedio y pesimista con diferentes desviaciones estándar ($\sigma=0.05, 0.1, 0.2$), cuando el beneficio económico neto del papel es maximizado.

Evaluando los casos optimista, promedio y pesimista para el beneficio económico neto de los no reciclables con diferentes desviaciones estándar ($\sigma=0.05, 0.1$ y 0.2), como en los casos anteriores (ver **Figura 4.2.5**). Primeramente, es importante notar que para las tres sigmas las líneas promedio (M1, M2 y M3) siempre se encuentra por encima de las líneas optimista y pesimistas, algunos ejemplos de esto son los puntos B, E y H cuyos

valores son 79.63, 85.83 y 100.89 \$MM/a. Adicionalmente, las líneas optimistas con diferentes sigmas tienen un valor máximo y tienden a decrecer abruptamente, los valores más grandes en este caso son los puntos A con \$86.45MM/a, D con \$99.95MM/a y G con \$128.67MM/a. Mientras que para los casos pesimistas las líneas tienden a ser líneas constantes, como se muestra en los puntos F, C e I con 70.82, 73.63 y 76.92\$MM/a, todos con valores muy similares.

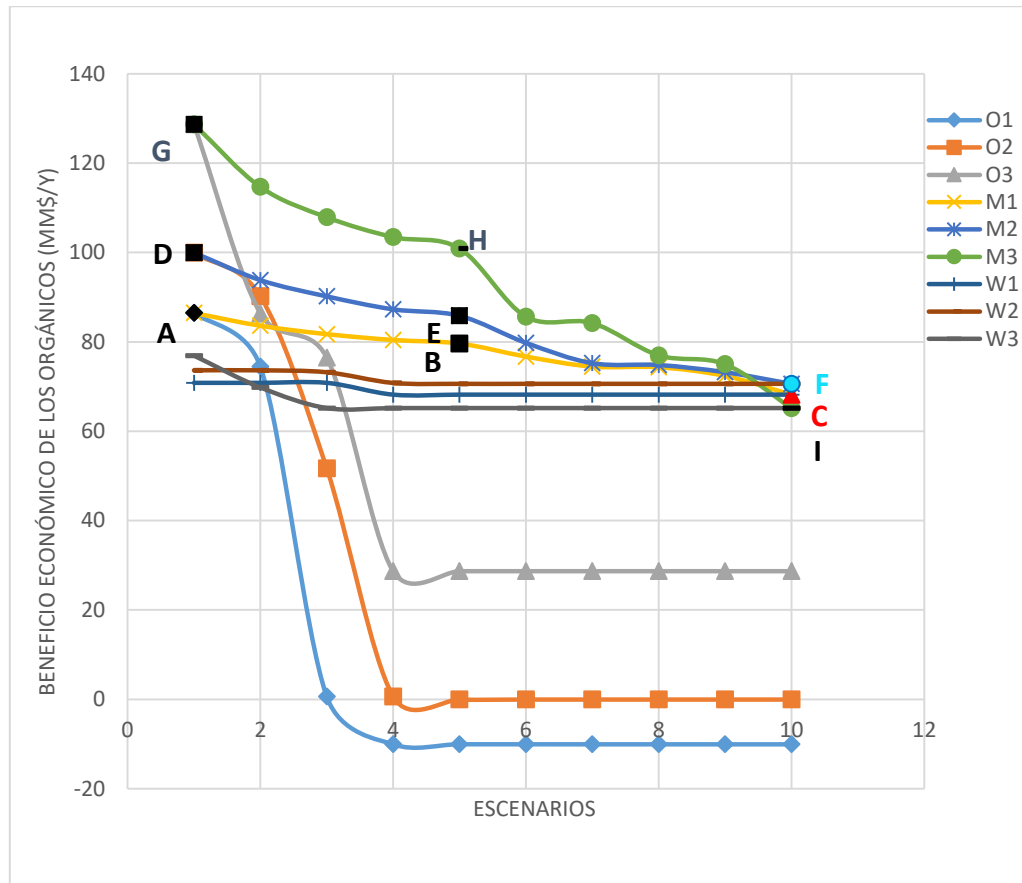


Figure 4.2.5 Casos optimista, promedio y pesimista con diferentes desviaciones estándar ($\sigma=0.05, 0.1, 0.2$), cuando el beneficio económico neto de los orgánicos es maximizado.

Finalmente, los resultados obtenidos para los casos optimista, promedio y pesimista fueron evaluados para las tres desviaciones estándar cuando los gastos del gobierno fueron analizados se muestran en la **Figura 4.2.6**. En la figura podemos ver que para las tres sigmas todas las líneas se encuentran en el mismo rango de valores. Por ejemplo, cuando $\sigma=0.05$ el punto A muestra el menor valor para la función objetivo de los gastos del gobierno, para el caso optimistas con \$-11.33MM/a. Por otro lado el punto B con -

\$11.89MM/a, muestra uno de los valores para un escenario del caso promedio. Los puntos A y B no están tan alejados del punto C con $-12.33\$/y$ que es el valor obtenido para el caso pesimista.

En el caso cuando $\sigma=0.1$, el valor más bajo para la línea O2 fue de $\$-10.61MM/a$ que es el punto D. El punto E es uno de los escenarios para el caso promedio (M2) con un valor de $\$-11.09MM/a$. Mientras que el punto F con un valor de $\$-12.33MM/a$ es el valor más grande obtenido en el caso pesimista.

El mejor valor para el caso pesimista fue obtenido cuando $\sigma=0.2$, como se muestra en el punto G con $\$-9.18MM/a$. No obstante, las líneas promedio y pesimista muestran los peores valores, como se muestra en el punto H con $\$-11.41$ en la línea M3 y en el punto I con $\$-13.15MM/a$ en la línea W3. Es interesante notar que para las tres desviaciones estándar consideradas las líneas promedio siempre están por encima de las líneas optimista y pesimista. Además, cuando $\sigma=0.2$, las líneas optimistas y pesimistas se juntan en gran parte de los escenarios.

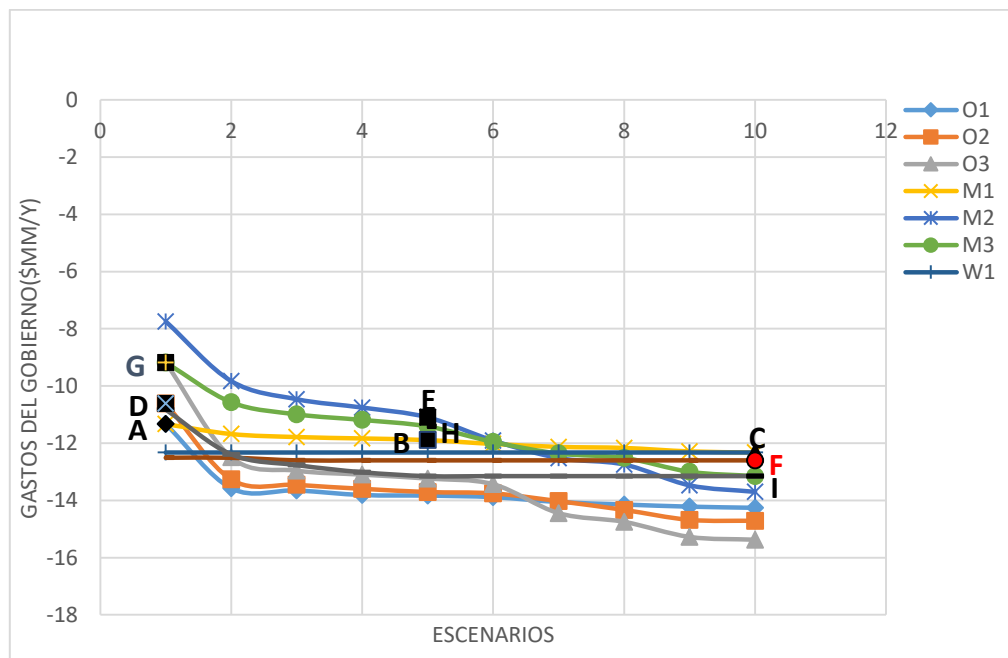


Figura 4.2.6 Casos optimista, promedio y pesimista con diferentes desviaciones estándar ($\sigma=0.05, 0.1, 0.2$), cuando los gastos del gobierno son minimizados.

Las funciones objetivo que se muestran como el beneficio económico neto del plástico reciclado (BENPR) y el beneficio económico neto del vidrio (BENV), no muestran resultados relevantes para los casos optimista, promedio y pesimista.

Una vez que los diferentes riesgos fueron analizados, los límites superiores e inferiores para cada una de las funciones objetivo son calculados (ver Tabla 1). Estos valores son usados principalmente para aplicar el modelo que implica a las diferentes partes interesadas. Los resultados obtenidos para la solución compromiso total con una sigma de 0.1 se muestran en la **Figura 4.2.7**. Las funciones objetivo con los más grandes valores fueron el porcentaje de RSU reutilizados, el BENT y el beneficio económico neto de los orgánicos con 97.66%, \$73.69MM/a y \$81.22MM/a, respectivamente.

La línea para el porcentaje de RSU reutilizados es constante al principio, solo para dos de diez escenarios muestra diferentes valores de consumo con 65 y 45%. Por otro lado las líneas para el BENT y BENO son similares, estas tienden a decrecer casi constantemente, excepto para un escenario, el cual muestra el menor valor para esta función con cero para el BENO y un valor negativo para el BENT.

Las líneas con los más bajos valores, pero aun con un beneficio económico positivo son el BENP y BENM, estas líneas siguen una tendencia constante casi lineal. Los valores más altos para estas dos líneas fueron de 7.3 y 1.7 \$MM/a, para la mayoría de los escenarios estas líneas toman valores muy similares a los más altos. La línea del BENPR reciclados toma un valor de cero, debido a que el límite superior para el plástico es cero, para los datos que se usan en este estudio (ver Tabla 1). Estudiando los resultados para los gastos del gobierno, la línea para estos muestra una pendiente suave, donde el rango de valores para ésta es de -\$10.9 a -\$13.48MM/a.

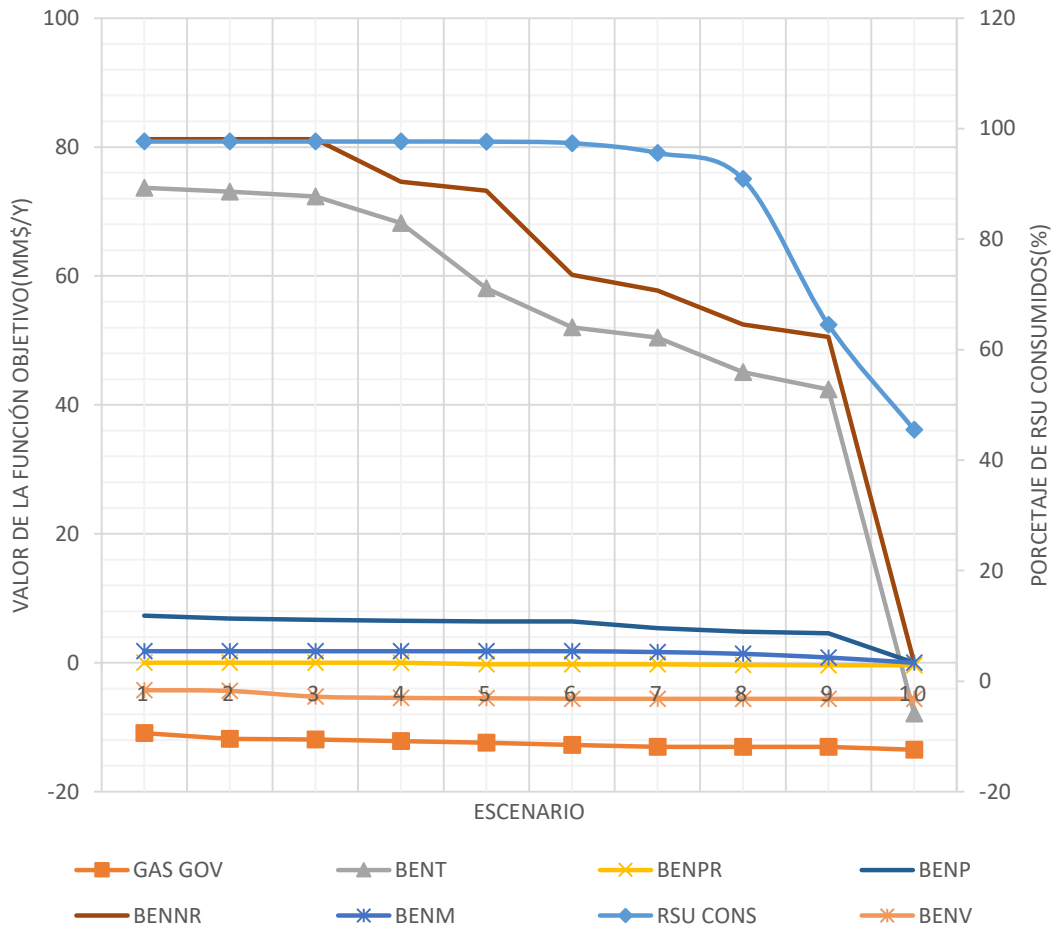


Figura. 4.2.7 Los resultados obtenidos para la solución compromiso total con una sigma de 0.1.

La **Figura 4.2.8** muestra el porcentaje de insatisfacción para cada función objetivo, donde la SCT es minimizada. Las funciones con el menor porcentaje de insatisfacción en la mayoría de los escenarios fueron el BENPR, el BENM y los gastos del gobierno, Los mejores valores para estas tres funciones fueron 0, 3.2 y 3.7% y los peores 2.7, 17 y 17.1%. Para el porcentaje de RSU reutilizados el porcentaje de insatisfacción es bajo para la mayoría de los escenarios, solo en dos de los diez escenarios el porcentaje incrementa drásticamente desde 2.4 a 56.8%. Similarmente, el BENM y el BENP tiende a tener valores pequeños de insatisfacción de 7.8 y 481%, respectivamente, luego tienden a incrementar a 46.3% y 61.9%, respectivamente. La función objetivo para el

BENV toma un valores pequeños entre 13.6 y 16.7% solo para dos escenarios y para el resto de los escenarios un promedio de 25%.

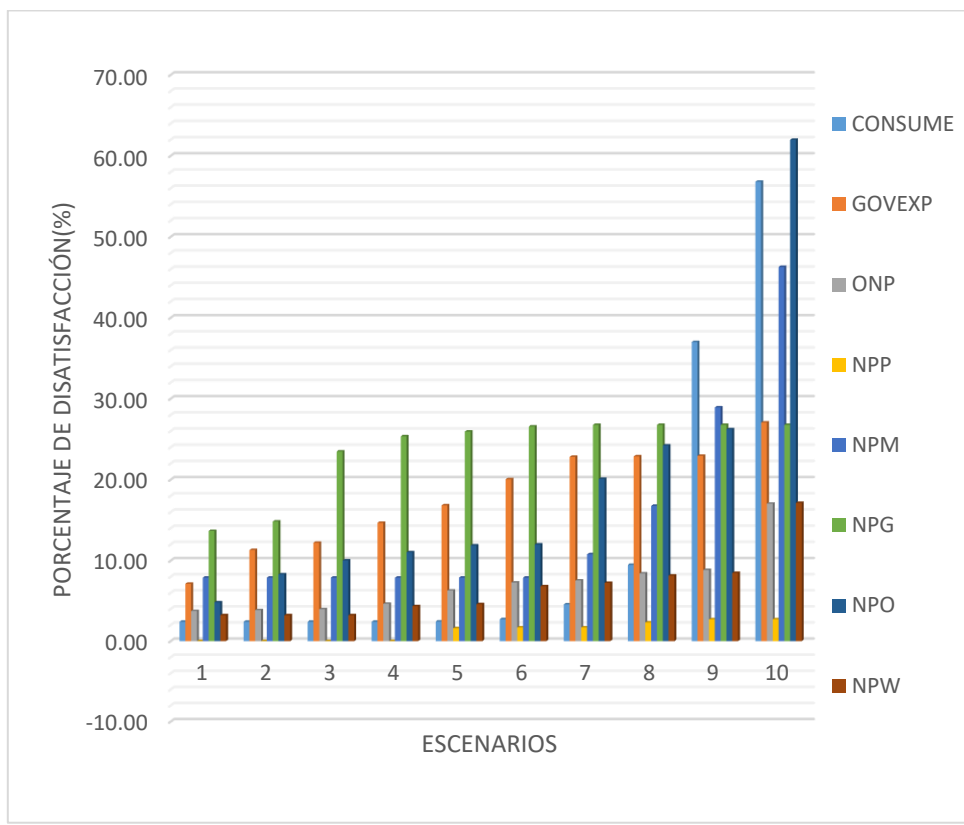


Figura 4.2.8. Porcentaje de insatisfacción para cada función objetivo cuando la SCT fue minimizada

Capítulo V. Conclusiones

En este proyecto de investigación se realizaron dos modelos para la planificación de sistemas para el manejo de los RSU considerando a las diferentes partes interesadas, en el primer modelo no se tomó en cuenta la incertidumbre, mientras que en el segundo se tomó en cuenta la incertidumbre y tres riesgos financieros.

El primer modelo de optimización matemática, determino el diseño y operación óptimos de la cadena de suministro, incluyendo la selección óptima de las instalaciones de procesamiento así como su ubicación. Además, se tomaron en cuenta los beneficios de las distintas partes interesadas, mediante el desarrollo de un enfoque de optimización multiobjetivo y de esta manera se conciliaron los beneficios de todas las partes implicadas (es decir, el gobierno, los proveedores, los consumidores y los proveedores de servicios de tratamiento).

Se aplicó la nueva metodología para para una región en México que involucra a cinco ciudades vecinas. El problema fue analizado bajo diferentes escenarios y las soluciones demostraron tener beneficios atractivos para los participantes involucrados. Para el Escenario 1 que considera cada planta de procesamiento pagando por la separación de sus residuos correspondientes, la mejor solución se obtuvo mediante la minimización del SCP donde el beneficio total fue de 62.781\$ MM / año, y los RSU consumidos fueron 95.021% del residuo total. Para el Escenario 2 donde el gobierno paga por el proceso de separación, la mejor solución correspondió a aquella en la que se minimizó la SC, donde el beneficio total fue de -68.158 \$ MM / año y los RSU consumidos fueron el 95.533%. Por último, para el Escenario 3, donde los residentes domésticos realizan separación de residuos, el beneficio asociado fue de 73.861\$MM / año, con el 95.533% de los residuos reciclados al minimizar la SC.

En el segundo modelo que considera incertidumbre y tres riesgos financieros diferentes (optimista, promedio y pesimista) demostró ser una útil herramienta para los tomadores de decisiones, debido a que muestra cuando vale la pena tomar una decisión más arriesgada y cuando no. Además, muestra información acerca de cuáles son los escenarios más probables.

Al considerar en el modelo a las diferentes partes interesadas, se obtuvo una solución que satisface a todas las funciones objetivo consideradas. Además, ya que nuestras funciones objetivo toman en cuenta los beneficios económicos, el ahorro de los gastos del gobierno y la reutilización de los RSU, se obtendrán incentivos económicos, ambientales para el manejo de los RSU.

Bibliografía

- Achillas, C., Moussiopoulos, N., Karagiannidis, A., Baniyas, G., Perkoulidis, G. The use of multi-criteria decision analysis to tackle waste management problems: a literature review. *Waste Manage*, 2013, 31 (2), 115–129.
- Aracil, C., Haro, P., Giuntoli, J., Ollero, P. Proving the climate benefit in the production of biofuels from municipal solid waste refuse in Europe. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 142, 2887-2900.
- Broitman, Dani, Ayalon O., Kan I., One size fits all? An assessment tool for solid waste management at local and national levels. *Waste Management*, 2015, 39, 277-286.
- Carvalho, P., Marques, R. C., Dollery, B., Is bigger better? An empirical analysis of waste management in New South Wales. *Waste Management*, 2015, 39, 277–286.
- Chanthawong, A., Dhakal, S., Stakeholders' perceptions on challenges and opportunities for biodiesel and bioethanol policy development in Thailand. *Energy Policy*, 2016, 91, 189–206.
- Chen, Y.T., Chang, D.S., Diffusion effect and learning effect: an examination on MSW recycling. *Journal of Cleaner Production*, 2010, 18 (5), 496-503.
- Chifari, R., Lo Piano, S., Bukkens, S. G. F., Giampietro, M., A holistic framework for the integrated assessment of urban waste management systems. *Ecological Indicators*, 2016, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.03.006>
- Couto, N., Silva, V., Monteiro, E., Rouboa, A., Exergy analysis of Portuguese municipal solid waste treatment via steam gasification. *Energy Conversion and Management*, 2017, 134, 235–246.
- Dewi, O., Koerner, I., Harjoko, T., A review on decision support models for regional sustainable waste management. In: The International Solid Waste Association World Conference Retrieved from <http://www.iswa.org/uploads/tx_iswaknowledgebase/Candra_Dewi.pdf>, 2010.

- Dowling, A. W., Ruiz-Mercado, G., Zavala, V. M. A framework for multi-stakeholder decision-making and conflict resolution. *Computers and Chemical Engineering*, 2016, 90, 136-150.
- Efficiency, E. (2007). US Energy Requirements for Aluminum Production.
- Environmental Protection Agency Office of Resource Conservation and Recovery, 2011
- Fuentes-Cortés, L. F., Dowling, A. W., Rubio-Maya, C., Zavala, V. M., Ponce-Ortega, J. M., Integrated design and control of multigeneration systems for building complexes. *Energy*, 2016, 116, 1403–1416.
- Gaines, L. L., & Mintz, M. M. (1994). *Energy implications of glass-container recycling* (No. ANL/ESD--18; NREL/TP--430-5703). Argonne National Lab., IL (United States); National Renewable Energy Lab., Golden, CO (United States).
- Gilardino, A., Rojas, J., Mattos, H., Larrea-Gallegos, G., Vazquez-Rowe, I., Combining operational research and Life Cycle Assessment to optimize municipal solid waste collection in a district in Lima (Peru). *Journal of Cleaner Production*, 2017, 156, 589-603.
- Giri, S., Nejadhashemi, A. P., Woznicki, S. A., Regulators' and stakeholders' perspectives in a framework for bioenergy development. *Land Use Policy*, 2016, 59, 143–153.
- Gobi, 2002. New Forecast for Polypropylene, Polystyrene and Polyurethane, Gobi International, May2
- Gracida-Alvarez, U. R., Keenan, L. M., Sacramento-Rivero, J. C., & Shonnard, D. R. (2016). Resource and Greenhouse Gas Assessments of the Thermochemical Conversion of Municipal Solid Waste in Mexico. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 4(11), 5972-5978.
- Harijani, A. M., Mansour, S., Karimi, B., Lee, C. G., Multi-period sustainable and integrated recycling network for municipal solid waste – A case study in Tehran. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 151, 96-108.
- Ho, W.S., Hashim, H., Lim, J.S., Lee, C.T., Sam, K.C., Tan, S.T., Waste Management Pinch Analysis (WAMPA): Application of Pinch Analysis for greenhouse gas

- (GHG) emission reduction in municipal solid waste management. *Applied Energy*, 2017, 185, 1481–1489.
- Hoornweg, D., Bhada-Tata, P., What a waste a global review of solid waste management, *Urban development series knowledge papers*, The World Bank, 2012, New York, USA.
- Howard, G. T. (2002). Biodegradation of polyurethane: a review. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 49(4), 245-252.
- Kannan, D., Role of multiple stakeholders and the critical success factor theory for the sustainable supplier selection process. *International Journal of Production Economics*, 2017. DOI: 10.1016/j.ijpe.2017.02.020.
- Kjeldsen, P., Barlaz, M. A., Rooker, A. P., Baun, A., Ledin, A., & Christensen, T. H. (2002). Present and long-term composition of MSW landfill leachate: a review. *Critical reviews in environmental science and technology*, 32(4), 297-336.
- Korai, M.S., Mahar, R.B., Uqaili, M.A., The feasibility of municipal solid waste for energy generation and its existing management practices in Pakistan. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 72, 338–353.
- Lemme, M.M.V., Rocha, M.H., Lora, E.E.S., Venturini, O.J., Lopes, B.M., Ferreira, C.H. Technoeconomic analysis and environmental impact assessment of energy recovery from Municipal Solid Waste (MSW) in Brazil. *Resources, Conservation and Recycling*, 2014, 87, 8–20.
- Mastellone, M. L., Perugini, F., Ponte, M., & Arena, U. (2002). Fluidized bed pyrolysis of a recycled polyethylene. *Polymer Degradation and Stability*, 76(3), 479-487.
- Matos, S., Silvestre, B. S., Managing stakeholder relations when developing sustainable business models: the case of the Brazilian energy sector. *Journal of Cleaner Production*, 2013, 45, 61-73.
- McPhail, A., Griffin, R., El-Halwagi, M.M., Medlock, K., Alvarez, P.J.J. Environmental, economic, and energy assessment of the ultimate analysis and moisture content

of municipal solid waste in a parallel co-combustion process. *Energy and Fuels*, 214, 28, 1453-1462

Mexican Ministry of Transportation and Communications, 2012. <<http://elreciclaje.org/content/reciclaje-de-vidrio>> (accessed 29.09.12).

Mexican National Institute of Ecology, 2012. Generation and Composition of the Municipal Solid Wastes, Mexico City, Mexico. <http://www2.ine.gob.mx/publicaciones/libros/128/cap3.html>> (accessed 04.01.13).

Mirmajlesi, S.R., Shafaei R., An integrated approach to solve a robust forward/reverse supply chain for short lifetime products. *Computers and Industrial Engineering*, 2016, 97, 222–239.

Morales, O., 1998. Técnicas de construcción de los sitios de disposición final de los residuos sólidos. Banobras. Federalismo y desarrollo. Año II, No.62.

Morrissey, A.J., Browne, J., Waste management models and their application to sustainable waste management. *Waste Management*, 2004, 24 (3), 297–308.

Municipal Solid Waste Generation, Recycling and Disposal in the United States Tables and Figures for 2010, US., USA.

Nabavi-Pelesaraei, A., Bayat R., Hosseinzadeh-Bandbafha, H., Afrasyabi, H., Berrada, A., Prognostication of energy use and environmental impacts for recycle system of municipal solid waste management. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 154, 602-613.

Nasrullah, M., Vainikka, P., Hannula, J., Hurme, M., Kärki, J., Mass, energy and material balances of SRF production process. Part 1: SRF produced from commercial and industrial waste. *Waste Management*, 2014, 34, 1398–1407.

Ng, W. P. Q., Lam, H. L., Varbanov, P. S., Klemeš, J. J., Waste-to-Energy (WTE) network synthesis for Municipal Solid Waste (MSW). *Energy Conversion and Management*, 2014, 85, 866–874.

- Niziolek, A.M., Onel, O., Hasan, M.M. F., A Floudas, C., Municipal solid waste to liquid transportation fuels – Part II: Process synthesis and global optimization strategies. *Computers and Chemical Engineering*, 2015, 74, 184–203.
- Niziolek, A.M., Onel, O., Hasan, M.M. F., A Floudas, C., Municipal solid waste to liquid transportation fuels – Part I: Mathematical modeling of a municipal solid waste gasifier. *Computers and Chemical Engineering*, 2014, 71: 636–647.
- Organización de las Naciones Unidas, ONU-Habitat, 2010 Solid Waste Management in
- Pérez-López, G., Prior, D., Zafra-Gómez, J.L., Plata-Díaz, A. M., Cost efficiency in municipal solid waste service delivery. Alternative management forms in relation to local population size. *European Journal of Operational Research*, 2016, 255, 583–592.
- Rada, E. C., Zatelli, C., Mattolin, P., Municipal solid waste collection and tourism. *Waste Management and the Environment*, 2014, 180, 187-197.
- Santibañez-Aguilar, J. E., Martínez-Gómez, J., Ponce-Ortega, J.M., Nápoles-Rivera, F., González-Campos, J.B., Serna-González, M., El-Halwagi, M.M. An optimal planning for the reuse of municipal solid waste considering economic, environmental and safety objectives. *AIChE Journal*, 2015; 61(6), 1881-1899
- Santibañez-Aguilar, J.E., Ponce-Ortega, J.M., González-Campos, J.B., Serna-González, M., El-Halwagi, M.M. Optimal planning for the sustainable utilization of municipal solid waste. *Waste Management*, 2013; 33(12), 2607-2622.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), 2013 <http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_resumen14/07_residuos/7_1_1.html>
- Soltani, A., Hewage, K., Reza, B., Sadiq, R., Multiple stakeholders in multi-criteria decision-making in the context of Municipal Solid Waste Management: A review. *Waste Management* 2015, 35, 318–328.

- Sukholthaman, P., Sharp, A., A system dynamics model to evaluate effects of source separation of municipal solid waste management: A case of Bangkok, Thailand. *Waste Management*, 2016, 52, 50–61.
- Sukholthaman, P., Shirahada, K., Technological challenges for effective development towards sustainable waste management in developing countries: Case study of Bangkok, Thailand. *Technology in Society*, 2015, 43, 231–239.
- Tan S. T., Lee, C.T., Hashim, H., Ho, W.S., Lim, J. S., Optimal process network for municipal solid waste management in Iskandar Malaysia. *Journal of Cleaner Production*, 2014, 71, 48-58.
- Tchobanoglous, G., Kreith, F., Handbook of Solid Waste Management. Second ed. McGraw-Hill, 2002 New York, USA.
- the World's Cities. Water and Sanitation in the World's Cities, Londres y Washington: Programa de las Naciones Unidas para los Asentamientos. Disponible en: <http://mirror.unhabitat.org/pmss/listItemDetails.aspx?publicationID=2918>
- Tonini, D., Dorini, G., Astrup, T. F., Bioenergy, material, and nutrients recovery from household waste: Advanced material, substance, energy, and cost flow analysis of a waste refinery process. *Applied Energy*, 2014, 121, 64–78.
- Vadenbo, C., Hellweg, S., Guillén-Gosálbez, G., Multi-objective optimization of waste and resource management in industrial networks – Part I: Model description. *Resources, Conservation and Recycling* 2014, (89), 52–63.
- Vucijak, B., Kurtagic, S. M., Silajdzic, I., Multicriteria decision making in selecting best solid waste management scenario: a municipal case study from Bosnia and Herzegovina. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 130, 166-174.
- Wang, H., Xu, J., Yu, H., Liu, X., Yin, W., Liu, Y., Liu, Z., Zhang, T., Study of the application and methods for the comprehensive treatment of municipal solid waste in northeastern China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 52, 1881–1889.

- Warren, A., El-Halwagi, M.M. An economic study on the co-generation of liquid fuel and hydrogen from coal and municipal solid waste. *Fuel Processing Technology*, 1996. 49, 157-166
- Yadav, V., Bhurjee, A.K., Karmakar, S., Dikshit, A.K., A facility location model for municipal solid waste management system under uncertain environment. *Science of the Total Environment*, 2017, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.02.207.
- Young, G. C. (2010). *Municipal solid waste to energy conversion processes: economic, technical, and renewable comparisons*. John Wiley & Sons.
- Zia, K. M., Bhatti, H. N., & Bhatti, I. A. (2007). Methods for polyurethane and polyurethane composites, recycling and recovery: a review. *Reactive and functional polymers*, 67(8), 675-692.
- McLean, K., & Li, X. (2013). Robust scenario formulations for strategic supply chain optimization under uncertainty. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 52(16), 5721-5734.
- Laokhongthavorn, L., & Chalida, U. (2017). A multi-objective optimization model for solid waste disposal under uncertainty: a case study of Bangkok, Thailand. *International Journal of Civil Engineering*, 15(2), 205-212.
- Xu, Z., Elomri, A., Pokharel, S., Zhang, Q., Ming, X. G., & Liu, W. (2017). Global reverse supply chain design for solid waste recycling under uncertainties and carbon emission constraint. *Waste Management*, 64, 358-370.
- Ma, X., Ma, C., Wan, Z., & Wang, K. (2017). A fuzzy chance-constrained programming model with type 1 and type 2 fuzzy sets for solid waste management under uncertainty. *Engineering Optimization*, 49(6), 1040-1056.
- Mishra, H., Karmakar, S., Kumar, R., & Singh, J. (2017). A framework for assessing uncertainty associated with human health risks from MSW landfill leachate contamination. *Risk Analysis*, 37(7), 1237-1255.
- INE, 2012. Final report for the integrated analysis for the technologies and option for sustainability and options for the bioenergy in Mexico. Mexico

City, Mexico. http://dx.doi.org/www2.ine.gob.mx/descargas/cclimatico/e2008e_bioenergia.pdf (Accessed 10.02.2012).