



**UNIVERSIDAD MICHOACANA  
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

---

---



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

**Uso de herramientas de optimización para atender problemáticas  
generadas por el COVID- 19**

**Tesis presentada por:**

**Ing. Rogelio Ochoa Barragán**

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

**MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA**

**Dirigida por: Dr. José María Ponce Ortega**

**Co-dirigida por: Dra. Aurora del Carmen Munguía López**

**Morelia, Michoacán.**

**Agosto 2022**

## **Resumen**

### **Uso de herramientas de optimización para atender problemáticas generadas por el COVID-19**

**Rogelio Ochoa Barragán**

Dirigido por: Dr. José María Ponce Ortega

Co-dirigido por: M.C. Aurora del Carmen Munguía López

La pandemia de COVID-19 ha provocado crisis en todos los campos en los que se desarrolla la raza humana. Debido a esto, el desarrollo de estrategias y modelos matemáticos de optimización para enfrentar las adversidades producidas por la pandemia COVID-19 juegan un papel determinante en áreas como la logística de vacunas, el consumo de energía, el impacto ambiental, el impacto económico y la gestión de los recursos médicos. Este trabajo presenta distintas estrategias de optimización multi-objetivo para la preservación de la calidad de vida en condiciones de pandemia. La aplicabilidad de cada una de las estrategias depende de una serie diversa de factores relacionados con diferentes parámetros de salud pública. Las estrategias presentadas pueden ser compatibles entre sí, generando un mayor beneficio. La primera estrategia que se presenta consiste en la distribución justa de vacunas considerando parámetros sociales y de salud pública en donde se emplean distintos esquemas de justicia, que, según el contexto de la región donde se aplique, puede obtener mejores resultados, siendo el esquema de justicia de Nash adecuado para niveles de riesgo epidemiológico bajo, el esquema de justicia de Rawls para niveles medios de riesgo y finalmente el esquema de economía social para niveles altos de riesgo epidemiológico. Como segunda estrategia se presenta una estructura circular para la revalorización de residuos sólidos urbanos, empleando un parque industrial que se encarga del procesamiento de todos los tipos de residuos, el modelo matemático empleado selecciona las tecnologías a implementar y sus respectivas capacidades de procesamiento en función del objetivo propuesto. Los resultados muestran que la estrategia es viable y la incorporación de impuestos verdes promueve el procesamiento de residuos con bajo potencial económico, generando un mayor beneficio ambiental y social.

**Palabras clave:** Optimización, covid-19, máquinas de aprendizaje, vacunas, residuos.

## **Abstract**

### **Use of optimization tools to address problems generated by COVID-19**

**Rogelio Ochoa Barragán**

Directed by: Dr. José María Ponce Ortega

Co-Directed by: M.C. Aurora del Carmen Munguía López

The COVID-19 pandemic has caused crises in all fields in which the human race develops. Due to this, the development of optimization strategies and mathematical models to face the adversities produced by the COVID-19 pandemic play a determining role in areas such as vaccine logistics, energy consumption, environmental impact, economic impact, and management of medical resources. This work presents different multi-objective optimization strategies for the preservation of quality of life in pandemic conditions. The applicability of each of the strategies depends on a diverse series of factors related to different parameters of public health. The strategies presented can be compatible with each other, generating a higher profit. The first strategy that is presented consists of the fair distribution of vaccines considering social and public health parameters where different justice schemes are used, which, depending on the context of the region where it is applied, can obtain better results, being the scheme of Nash justice suitable for low epidemiological risk levels, the Rawls justice scheme for medium risk levels and finally the social economy scheme for high epidemiological risk levels. As a second strategy, a circular structure is presented for the reevaluation of urban solid waste, using an industrial park that is responsible for processing all types of waste, the mathematical model used selects the technologies to be implemented and their respective processing capacities based on the proposed goal. The results show that the strategy is viable and the incorporation of green taxes promotes the processing of waste with low economic potential, generating a greater environmental and social benefit.

**Keywords:** Optimization, covid-19, machine learning, vaccines, waste.

# Contenido

Resumen.....	iii
Abstract.....	iv
Lista de Figuras.....	viii
Lista de Tablas.....	x
Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1 Generalidades.....	1
1.2 Justificación de la investigación.....	1
1.3 Hipótesis.....	4
1.4 Objetivo general.....	4
1.4.1 Objetivos particulares.....	4
1.5 Planteamiento del problema.....	4
Capítulo 2. Marco teórico.....	5
2.1 Distribución justa de vacunas en condiciones de pandemia.....	5
2.1.1 Diferentes capacidades de producción.....	6
2.1.2 Diferentes contextos para una asignación correcta.....	6
2.1.3 Esquemas de justicia.....	8
2.2 Diseño óptimo para revalorizar los residuos durante el COVID-19.....	10
2.2.1 Tecnologías de procesamiento de desechos electrónicos.....	10
2.2.2 Tecnologías de procesamiento de desechos metálicos.....	10
2.2.3 Tecnologías de procesamiento de residuos de papel.....	11
2.2.4 Tecnologías de procesamiento de residuos de vidrio.....	11
2.2.5 Tecnologías de procesamiento de desechos plásticos.....	11
2.2.6 Tecnologías de procesamiento de desechos médicos.....	12
2.2.7 Tecnologías de procesamiento de residuos orgánicos.....	12
2.2.8 Máquinas de aprendizaje para la predicción de residuos.....	13

Capítulo 3. Metodología.....	14
3.1 Metodología propuesta para la distribución de vacunas.....	14
3.1.1 Ubicación del proyecto para la distribución de vacunas .....	16
3.1.2 Formulación del modelo matemático de distribución .....	19
3.1.2.1 Restricciones para un diseño factible .....	21
3.1.2.2 Establecimiento de parámetros .....	22
3.1.2.3 Balances en la red de distribución .....	27
3.1.2.4 Esquemas de distribución .....	28
3.1.2.5 Costos asociados a la distribución de vacunas .....	29
3.2 Metodología propuesta para la revalorización de RSU .....	33
3.2.1 Modelo matemático para la gestión de RSU .....	36
3.2.1.1 Balance de residuos en la ciudad.....	36
3.2.1.2 Disyunciones para elegir qué tecnología de procesamiento usar .....	40
3.2.1.3 Costos y ventas asociados a la gestión de RSU.....	51
3.2.1.4 Funciones objetivo para la gestión de RSU.....	54
3.2.1.5 Máquina de aprendizaje para futuras predicciones de generación de residuos.....	55
3.2.1.6 Ubicación del Proyecto para la gestión de residuos .....	58
Capítulo 4. Resultados. ....	60
4.1 Resultados de la distribución justa de vacunas.....	60
4.2 Resultados de la gestión de RSU.....	67
4.2.1 Análisis de residuos electrónicos.....	70
4.2.2 Análisis para metales .....	71
4.2.3 Análisis para papel.....	71
4.2.4 Análisis para vidrio.....	72
4.2.5 Análisis para plástico.....	72

4.2.6 Análisis para residuos médicos.....	73
4.2.7 Análisis para residuos orgánicos .....	73
4.2.8 Planeación estratégica de largo plazo con máquinas de aprendizaje.....	79
Capítulo 5. Conclusiones.....	82
5.1 Conclusiones generales.....	82
5.2 Conclusiones particulares .....	82
5.3 Contribuciones a la investigación.....	84
Referencias.....	86
Apéndice A.....	103
Apéndice B.....	106

## Lista de Figuras

Figura 2.1. Ejemplo de conjunto de soluciones Pareto para un problema multi-objetivo.....	7
Figura 3.1. Enfoque propuesto para resolver el problema de distribución de vacunas .....	15
Figura 3.2. Superestructura propuesta para la distribución de vacunas entre los diferentes estados de México (Semáforo COVID consultado el 23 de noviembre del 2020 .....	16
Figura 3.3. Representación general de la estrategia propuesta para la revalorización de los residuos.....	33
Figura 3.4. Superestructura propuesta para el manejo de residuos sólido.....	35
Figura 3.5. Esquema del flujo de trabajo de las máquinas de aprendizaje .....	56
Figura 3.6. Implementación en conjunto de Spyder-GAMS .....	57
Figura 4.1. Vacunas compradas con diferentes capacidades de inversión (para todos los escenarios) .....	62
Figura 4.2. Escenario 1: Soluciones de Pareto para la asignación de vacunas con diferentes esquemas de distribución y capacidades de inversión sin pérdida de vacunas y variables de peso iguales a 1 (Escenario ideal).....	63
Figura 4.3. Escenario 2: Soluciones de Pareto para la asignación de vacunas con diferentes esquemas de distribución y capacidades de inversión con pérdida de vacunas y variables de peso iguales a 1.....	64
Figura 4.4. Escenario 3: Soluciones de Pareto para la asignación de vacunas con diferentes esquemas de distribución y capacidades de inversión con las vacunas perdidas y las variables de peso consideradas. ....	65
Figura 4.5. Escenario 3: Soluciones de Pareto para la asignación de vacunas con diferentes esquemas de distribución y capacidades de inversión con las vacunas perdidas, ponderando en función de la densidad poblacional.....	66
Figura 4.6. Curva de Pareto para un sistema de instalaciones de procesamiento basado en	

residuos sólidos urbanos.....	68
Figura 4.7. Distribución de costos y ventas de la cadena de suministro en base a residuos sólidos.	68
Figura 4.8. Solución B: Análisis de residuos inorgánicos.....	74
Figura 4.9. Solución B: Análisis de residuos médicos y residuos orgánicos .....	75
Figura 4.10. Solución B: Distribución de costos y ventas para diferentes tipos de RSU....	75
Figura 4.11. Solución C: Análisis de residuos inorgánicos.....	76
Figura 4.12. Solución C: Análisis de residuos médicos y residuos orgánicos .....	77
Figura 4.13. Solución C: Distribución de costes y ventas para diferentes tipos de RSU....	77
Figura 4.14. Modelos de regresión del conjunto de datos independientes. ....	78
Figura 4.15. Modelo de aprendizaje automático para la predicción de toneladas de residuos recolectados y residuos enviados al relleno sanitario.....	80



## Lista de Tablas

Tabla 3.1. Nomenclatura usada en la formulación de distribución de vacunas.....	20
Tabla 3.2. Parámetros para cada estado incluyendo población ( $p_i$ ), tasa de casos de COVID-19 ( $r_i$ ) y tasa de mortalidad de COVID-19 ( $M_i$ ), así como camas disponibles ( $B^{av}_i$ ), pacientes dados de alta ( $d^p_i$ ), y estancia media de los pacientes en días ( $s^a_i$ ) para todas las enfermedades. La información relacionada con COVID-19 se basa en los casos notificados por DGE [61] y SINAISCAP [62]......	24
Tabla 3.3. Tasa de incidencia delictiva por la entidad federativa de ocurrencia por cada cien mil habitantes [63]......	25
Tabla 3.4. Fracción de pérdidas por estado según la tasa de incidencia delictiva. ....	26
Tabla 3.5. Valores de la variable de peso basados en el semáforo COVID-19 [64]. ....	29
Tabla 3.6. Los costos de almacenamiento de las granjas de congelación por mes, por vacuna [65, 66]. ....	31
Tabla 3.7. Costes de las vacunas [67]......	31
Tabla 3.8. Nomenclatura usada en la formulación de gestión de residuos.....	35
Tabla 3.9. Fracciones de separación para cada tipo de residuo. ....	37
Tabla 3.10. Fracciones de separación para los diferentes sub-residuos [69, 70, 75]......	38
Tabla 3.11. Costos fijos y variables de tecnologías de procesamiento.....	45
Tabla 3.12. Factores de eficiencia para las tecnologías de procesamiento.....	50
Tabla 3.13. Parámetros asignados para los costos de separación y procesamiento de residuos y productos. ....	54
Tabla 3.14. Conjunto de datos de Entrenamiento y Prueba para la máquina de aprendizaje [108,109,110]. ....	58

## **Capítulo 1. Introducción**

En el presente capítulo se abordan tanto generalidades conceptuales del tema desarrollado, así como la justificación, hipótesis, objetivos particulares y generales del mismo.

### **1.1 Generalidades**

El mundo ha sido testigo de múltiples pandemias a lo largo de su historia. Actualmente nos enfrentamos a la generada por el COVID-19 que ha provocado un cambio radical en el estilo de vida de las personas en todo el mundo [1]. A pesar de los avances tecnológicos en el área médica, ha sido imposible prevenir una propagación mundial del virus, así como un alto grado de mortalidad, tomándonos por sorpresa por la gran falta de previsión en la gestión sanitaria [2]. Lo importante son las decisiones que se tomen a partir de ahora, ya que la actual pandemia no solo ha generado problemas de salud, sino también problemas de diversa índole como problemas ambientales por un aumento significativo de los residuos sanitarios, y un gran incremento del consumo de plásticos [3].

Desde un punto de vista más amable, podemos afirmar que la respuesta a la pandemia global ha generado grandes avances en diversas áreas. Uno de los más notables es la enorme mejora en el desarrollo de vacunas. Anteriormente, las vacunas tardaban más de 10 años en desarrollarse, mientras que la vacuna para COVID 19 se desarrolló en un tiempo récord de menos de un año (para vacunas como las desarrolladas por Pfizer, Moderna, Gamaleya y AstraZeneca) [4]. Otro innegable gran avance es el desarrollo de las tecnologías digitales, que ha jugado un papel fundamental en la preservación de la economía y la educación al crear sistemas de teletrabajo y plataformas móviles que permiten trabajar desde cualquier lugar [5].

En relación a los desechos sólidos, su gestión ya era un problema incluso antes de la pandemia, especialmente en los países en desarrollo, debido a la falta de infraestructura para el procesamiento de desechos. El riesgo actual por una mala gestión de los residuos es tan alto que se estima que mueren anualmente alrededor de 9,2 millones de personas [6].

### **1.2 Justificación de la investigación**

De acuerdo con la literatura revisada, resulta difícil encontrar enfoques de optimización orientados al combate de la pandemia COVID-19, en particular para contrarrestar los efectos que esta genera en relación a la generación de residuos sólidos y a la distribución justa de vacunas. Sin embargo, se han presentado trabajos con enfoques similares, Matrajt *et al.* [7] examinaron los múltiples y posibles escenarios de la distribución de vacunas clasificando por edades a la población y a las vacunas según su efectividad y disponibilidad, Persad *et al.* [8] consideraron la repartición ética de los recursos médicos en condiciones de escasez, tales como órganos y vacunas planteando tratar a toda la población como iguales, priorizar a los miembros menos favorecidos de la sociedad (gente mayor y gente enferma) y finalmente priorizar a las personas más jóvenes, Munguía-López y Ponce-Ortega [9] desarrollaron un modelo de optimización demostrando que los esquemas de justicia pueden ser empleados no solo en la asignación de recursos. Es importante destacar que las metodologías revisadas anteriormente no consideran emplear simultáneamente factores ajenos a la parte médica, como puede ser la corrupción y la inseguridad en México que seguramente será un factor a tomar en cuenta para la distribución de vacunas, además, de que no emplean una optimización multi-objetivo usando esquemas de distribución y minimización de costos. Para este trabajo se entiende por distribución justa a aquella capaz de reducir en mayor medida la tasa de contagios por COVID-19 para las diferentes personas consideradas en una región.

En relación a la generación de residuos sólidos urbanos (RSU), Paut-Kusturica *et al.* [12] realizaron una consulta popular, donde se propone la implementación impuestos verdes que permitan promover la correcta disposición de los medicamentos. Munguía-López *et al.* [13] propusieron una estructura coordinada para el reciclaje de RSU, impulsada por la implementación de impuestos sobre todos los residuos destinados al vertedero. También incluyeron un análisis de sensibilidad con diferentes tasas de impuestos, lo que permitió encontrar la tasa mínima que evita el envío de grandes cantidades de residuos al vertedero. Santibañez-Aguilar *et al.* [13] presentaron una estrategia de optimización para el uso sostenible de RSU. Sin embargo, los resultados, aunque favorables, tienden a no reciclar ciertos tipos de residuos ( p. ej. Vidrio). Esto se debe a los altos costos de separación y transporte inherentes al proceso de reciclado del vidrio y las largas distancias entre las plantas de tratamiento. Munguía-López *et al.* [14] presentaron una estrategia de optimización para el

diseño óptimo de conjuntos residenciales, que involucra la satisfacción de energía y se asocia al consumo de demandas de agua dulce, considerando alternativas como captación de agua de lluvia, tratamiento y reciclaje de agua, cogeneración y gasificación de residuos sólidos. y cultivo de algas. Las estrategias mencionadas coinciden con el enfoque de intensificación de procesos, donde se utilizan materias primas naturales o residuales que permiten maximizar el rendimiento e indirectamente los beneficios económicos [15, 16]. Desde un marco de integración másica, esto podría ser especialmente útil para aquellos residuos con bajo potencial económico y la construcción de un parque industrial destinado al procesamiento de RSU podría impulsar este tipo de abordaje [17].

Existen muchas oportunidades de innovación en el campo de la intensificación de procesos, durante la última década, el desarrollo de la intensificación de procesos se ha orientado casi exclusivamente a procesos químicos a gran escala [18, 19], por lo que es necesario resaltar la relevancia en la incursión de procesos de intensificación en otros campos, como la gestión de residuos sólidos urbanos, ya que la reutilización y revalorización de residuos es una forma de intensificación [20] aplicada a una cadena de suministro diferente. En ninguno de los trabajos anteriores se ha considerado una estrategia que contemple un marco circular compuesto por un parque industrial con una amplia gama de tecnologías disponibles, una tasa variable de impuestos verdes que incentiva el procesamiento de residuos peligrosos y minimiza los impactos negativos sobre el medio ambiente. En este trabajo se presenta una estrategia de optimización económica, ambiental y social multiobjetivo para el tratamiento de los RSU. El enfoque propuesto implica la evaluación de la construcción de un parque industrial que promueva la intensificación de los procesos de reciclaje, reduciendo los costos de transporte, considerando diferentes alternativas para los RSU como el reciclaje, WTE (Waste To Energy) y disposición en vertedero. El modelo matemático incluye una tasa de impuesto variable para aumentar las tasas de reciclaje, especialmente para aquellos desechos con bajo potencial económico, como el tratamiento de desechos médicos, que, debido a la pandemia, se han incrementado significativamente.

### **1.3 Hipótesis**

La implementación de estrategias de optimización en la distribución de vacunas y la gestión de residuos que optimicen la ruta de proceso de estos problemas multiobjetivo, hará posible obtener un conjunto de soluciones distintas que proporcionen alternativas para la toma de decisiones en condiciones de pandemia.

### **1.4 Objetivo general**

Proponer modelos de optimización para la distribución de vacunas y gestión de residuos sólidos bajo las condiciones ambientales, económicas y sociales características de la pandemia COVID-19.

#### **1.4.1 Objetivos particulares**

- Realizar una simulación de distribución de vacunas a nivel nacional alimentando el modelo con esquemas de distribución, parámetros poblacionales y factores como la inseguridad encontrando la vía óptima de distribuir las vacunas por estado que mejor disminuye la tasa de contagios y los costos asociados.
- Realizar una simulación para la gestión y tratamiento óptimos de los distintos residuos sólidos urbanos, donde una cadena de valor circular que procesa todo tipo de residuos en un parque industrial es propuesta.
- Establecer las restricciones, funciones objetivo y variables de decisión con base a los beneficios económicos y sociales.
- Determinar un conjunto de soluciones alternativas a través del tiempo empleando máquinas mediante simulaciones sucesivas del proceso.

### **1.5 Planteamiento del problema**

La generación de estrategias para la preservación de la calidad de vida durante una pandemia tiene como principal reto escoger cuáles serán las variables y factores a tomar en cuenta para generar una estrategia que sea capaz de reducir las muertes generadas por el COVID-19, una estrategia que considere los factores correctos puede resultar en una disminución de la duración de esta pandemia, y al contrario una mala asignación de estas vacunas puede que no sea capaz de reducir la tasa de contagios.

## Capítulo 2. Marco teórico

Los conceptos teóricos involucrados en el desarrollo de los problemas abordados son presentados en este capítulo. Como primera parte se describen conceptos empleados para la distribución justa de vacunas, seguido de los relacionados en la gestión y procesado de residuos sólidos urbanos.

### 2.1 Distribución justa de vacunas en condiciones de pandemia

Las vacunas normalmente requieren muchos años de desarrollo debido a la lentitud del proceso que es complejo y costoso. Además, durante este proceso, muchas opciones candidatas a vacunas son descartadas para producir una vacuna certificada [21]. El proceso de fabricación toma una secuencia lineal de pasos debido al costo y las altas tasas de fallo, y se requieren múltiples pausas para el análisis de datos, lo que explica la lentitud del proceso. Esta nueva pandemia obligó a los investigadores a implementar el desarrollo de una vacuna que ejecuta muchos pasos del desarrollo en paralelo, lo que conduce a un alto riesgo financiero. Por ejemplo, las pruebas en humanos se pueden realizar en paralelo con pruebas con animales durante la fase 1 del desarrollo de la vacuna [22]. La pandemia COVID ha provocado una demanda simultánea de vacunas en todo el mundo. Según Laurie *et al.* [23], para el establecimiento de un sistema de asignación de vacunas a nivel mundial, se requieren estudios clínicos y serológicos para confirmar qué sectores de la población siguen presentando el mayor riesgo una vez que se dispone de las vacunas.

Un creciente número de datos sugiere que las personas con obesidad tienen peores reacciones y una proporción significativa de ellas puede requerir cuidados intensivos [24]. Además, la diabetes, las enfermedades cardiovasculares, cerebrovasculares y pulmonares, así como la edad son múltiples factores de riesgo asociados con la mortalidad en pacientes con COVID-19 [25]. Lamentablemente, los pacientes de edad avanzada son más susceptibles a una afección más grave y cuentan con un mayor índice de mortalidad porque son más propensos a la disfunción o el fracaso de órganos multisistémicos [26].

En el mundo se desarrollaron 200 vacunas experimentales contra COVID-19, pero sólo 3 vacunas pasaron la fase 3 y alcanzaron la certificación de las autoridades sanitarias de diferentes países donde se ha demostrado la seguridad y la eficacia [27]. La mayor incógnita

con respecto a la producción de vacunas es si hay suficiente capacidad para producir la cantidad requerida en el mundo [28]. Se prevé que AstraZeneca, Pfizer y Moderna podrán producir 5,300 millones de dosis juntas durante 2021. La capacidad de producción rusa (vacuna Gamaleya) podría llegar a otros 500 millones de personas al año fuera de Rusia. Aunque la producción dentro de ese país, según las autoridades rusas, la comenzará en 2021. La capacidad de producción declarada por los desarrolladores se ha superado solamente con pedidos anticipados de diferentes países y todavía hay países pendientes de realizar sus respectivos pedidos [29].

### **2.1.1 Diferentes capacidades de producción**

La distribución equitativa de la vacuna entre países es otro problema a tener en cuenta. De acuerdo con las capacidades de producción dadas por los desarrolladores:

- La mitad de las que producirán AstraZeneca, Pfizer, Moderna y Gamaleya ha sido reservada por 32 países: los 27 de la Unión Europea y otros cinco países ricos que, en conjunto, representan alrededor del 13% de la población mundial [30].
- De presentarse seis vacunas nuevas con resultados aún sin anunciar, la proporción que comprarán se mantiene en el 50%.
- Las dosis pre-ordenadas por los países alcanzan para cubrir diferentes proporciones de sus poblaciones (de más del 100% a porcentajes mínimos).
- Muchos países aún no han realizado su reserva [28].

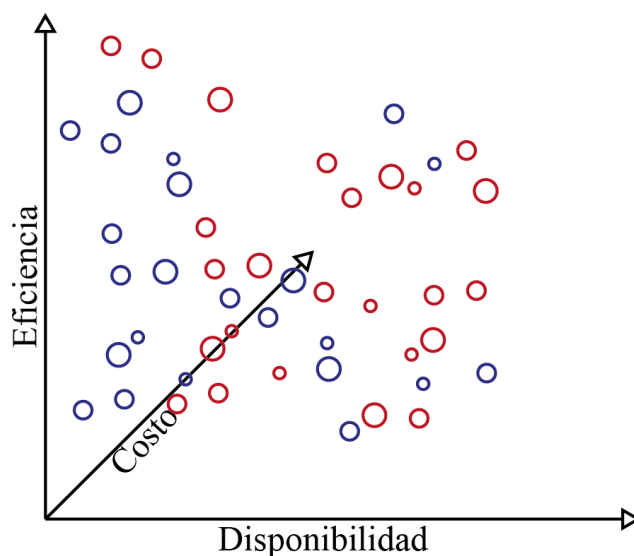
### **2.1.2 Diferentes contextos para una asignación correcta**

Una asignación correcta de recursos es importante para tomar decisiones, especialmente cuando hay contextos diferentes. Por ejemplo, los presentados por [28]:

- Hay menos unidades (vacunas) disponibles de lo esperado.
- Baja eficacia de la vacuna entre adultos mayores u otros subgrupos de la población.
- Acontecimientos adversos imprevistos debido a la vacuna.
- Hay más de un tipo de vacuna disponible.
- La propagación de la epidemia continúa cuando la vacuna comienza a estar disponible.

En el mundo real es común que muchos problemas de búsqueda y optimización se planteen

naturalmente como problemas de programación no lineal que tienen múltiples objetivos en conflicto. Existe una falta en las técnicas de solución para estos problemas y debido a esto, tales problemas acabaron convirtiéndose artificialmente en un problema de un solo objetivo. La dificultad se encuentra en que principalmente este tipo de problemas generan no una sino un conjunto de múltiples soluciones de compensación (conocidas como soluciones óptimas de Pareto), en lugar de una única solución. Lo que vuelve de gran importancia encontrar no solo una solución de Pareto sino encontrar tantas como lo permita el problema. Esto es necesario para que un tomador de decisiones pueda escoger la solución óptima de Pareto que mejor compense todos los objetivos propuestos del conjunto de soluciones obtenido [30] (ver **Figura 2.1**).



**Figura 2.1.** Ejemplo de conjunto de soluciones Pareto para un problema multi-objetivo.

Durante el proceso de optimización es necesario llegar a una única solución de todo el conjunto, con respecto a la importancia de los diferentes objetivos un tomador de decisiones debe escoger la solución que mejor compense todos los objetivos [31]. Veldhuizen y Lamont [32] establecieron la asignación de preferencias (escoger que objetivo tiene mayor importancia) puede hacerse antes (a priori), durante (progresivo) o después (a posteriori) en el proceso de optimización.

Si se escoge un enfoque a priori, el problema pasa de ser de optimización multi-objetivo a un problema con un solo objetivo especificando por qué se prefiere este criterio sobre todos los



demás. Sin embargo, por lo general no son factibles, ya que requieren que el usuario explique y sopesar exactamente los diferentes objetivos antes de conocer las alternativas. Esto nos lleva a que la mayoría de los enfoques de optimización multiobjetivo se puedan clasificar como a posteriori.

### **2.1.3 Esquemas de justicia**

La justicia puede parecer una medida ambigua (y también riesgosa) como menciona Munguía-López [33] en trabajos previos, lo que llevo a la necesidad de implementar una definición de lo que se considera justo o injusto y requiere que se establezca un conjunto de axiomas fundamentales (propiedades) que sean "adecuados" para un esquema de asignación justa que satisfaga las necesidades de todos los interesados en medida de lo posible. Un conjunto bien establecido de axiomas propuesto por Sampat y Zavala [34] considera al esquema de distribución justo si cumple con las propiedades siguientes:

- **Optimalidad de Pareto:** Con la optimización de Pareto se puede asegurar que la solución seleccionada será la que aumente en mayor medida la satisfacción de todos los interesados sin disminuir la utilidad de los demás interesados (la solución que mejor distribuya las penalizaciones)
- **Anonimidad (simetría):** La simetría entre las partes interesadas permite tomar a todas las partes interesadas como iguales asegurando que no exista discriminación voluntaria o involuntaria en la asignación de bienes.
- **Invariancia afín:** La invariancia afín permite que una asignación de bienes donde intervienen distintas escalas de utilidades no afecte a la distribución priorizando a las partes interesadas de mayor o menor escala.
- **Independencia de alternativas irrelevantes:** La asignación utilidades irrelevantes en el conjunto no afecta la elección de una asignación de utilidades sobre otra.
- **Monotonicidad restringida:** establece que, un conjunto de utilidades factibles expandido debería dominar el conjunto de unidades factibles original.

Recientemente, Munguía-López y Ponce-Ortega [10] desarrollaron una estrategia de optimización para la asignación de vacunas COVID-19, a través de diferentes esquemas de equidad. Aquí, se analizaron diferentes esquemas de distribución (economía social, Nash,

justicia Rawlsiana y economía social II) y se aplicaron utilizando el estudio de caso de México.

La principal preocupación del análisis de economía social es cómo se deben distribuir los ingresos totales entre diferentes individuos [35]. La magnitud de los ingresos totales se tiene en cuenta mediante el análisis del bienestar social (o, de manera similar, el nivel medio de ingresos) y también su grado de desigualdad [36]. Se pueden obtener soluciones inequitativas en presencia de múltiples asignaciones con diferentes escalas que hacen que este esquema sea deficiente en algunos escenarios. Por otro lado, el esquema de distribución de Rawls surge de la teoría de Rawls llamada "justicia como equidad". Chung [37] indicó que esta teoría está estructurada por los siguientes tres principios que se establecen en orden de prioridad estricto de la siguiente manera:

1. El Principio de Igualdad Máxima Libertades Básicas: Cada persona debe tener el mismo derecho a las libertades básicas.
2. El Principio de Igualdad Justa de Oportunidades: Las posiciones y oficios disponibles a todos en condiciones de igualdad de oportunidades deben atribuirse a las desigualdades económicas sociales.
3. El Principio de Diferencia: Las desigualdades sociales y económicas deben organizarse de una manera que beneficie más a los miembros menos favorecidos de la sociedad.

Sin embargo, este esquema podría llevar a soluciones no únicas. Alternativamente, se ha propuesto el esquema Nash. Originalmente este esquema era un esquema de arbitraje único para juegos de negociación de dos personas. Más tarde, los axiomas de Nash fueron modificados, y esto permitió dar un esquema funcional de n-personas [38]. Maximizar la "felicidad" es el objetivo de bienestar social de Nash. Aquí, la asignación óptima de Pareto  $x^*$  se compara favorablemente con cualquier otra asignación óptima de Pareto  $x$  con el propósito de que, al cambiar de  $x$  a  $x^*$ , el porcentaje de ganancias en felicidad debe ser mayor que el porcentaje de pérdidas [39]. Dos de los atributos más notables de este esquema son:

1. Libertad de escala: la escala de valoraciones del individuo es independiente de su asignación óptima  $x^*$ .
2. La equidad y la eficiencia son su compromiso natural.

Este esquema proporciona soluciones equilibradas que ponen los datos en la misma escala mediante logaritmos. Por lo tanto, la penalización entre las partes interesadas grandes y pequeñas es más sistemática.

## **2.2 Diseño óptimo para revalorizar los residuos durante el COVID-19**

La revalorización de los residuos, puede ser llevada a cabo de muchas formas, tomando en cuenta el potencial económico de cada tipo de residuo. Normalmente pueden considerarse dos principales vías de revalorización, aquellas donde a través del reciclaje se producen nuevos materiales o productos, y por otro lado todo aquel residuo que tenga potencial para poder ser convertido a energía, la decisión sobre que por cual vía optar, depende principalmente de la naturaleza del residuo y de la tecnología de procesamiento a emplear. Para este trabajo se consideran residuos electrónicos, metales, vidrio, plásticos, papel, y como caso especial, los residuos orgánicos usados para producir composta, como residuos destinados a producir nuevos materiales o productos. Por otro lado, los residuos médicos y orgánicos son considerados como residuos con alto potencial para ser convertidos a energía debido a su bajo potencial económico. A continuación, se mencionan las tecnologías sugeridas para cada tipo de proceso según su tipo de revalorización:

### **2.2.1 Tecnologías de procesamiento de desechos electrónicos.**

Para el procesamiento de desechos electrónicos, se consideran dos subtipos: desechos de dispositivos electrónicos pequeños y grandes [40]. Normalmente este tipo de residuos contiene una gran variedad de metales con gran potencial económico. Sin embargo, debido a la gran cantidad de materiales que contienen, su reciclaje se vuelve una operación bastante difícil, lo que hace que el proceso de reducción de tamaño y separación magnética sea la opción más viable para la recuperación de metales [41].

### **2.2.2 Tecnologías de procesamiento de desechos metálicos**

Para los residuos metálicos, existen más alternativas con diferentes costos asociados. Por ejemplo, la hidrometalurgia es relativamente barata en términos de inversión y tiene un bajo impacto ambiental ya que no genera gases ni polvos dañinos para el ambiente, lo que la hace ideal para aplicaciones de pequeña y mediana escala, además de tener un alto porcentaje de recuperación de metales utilizando un proceso de dos etapas basado en la lixiviación de metales [42]. Por otro lado, la pirometalurgia tiene una gran desventaja, ya que, debido a las

altas temperaturas que se manejan en este proceso, se pueden perder materiales secundarios como el plástico. Además, requiere una gran cantidad de energía y, por lo tanto, no es amigable con el medio ambiente [43]. La refundición es la última opción propuesta para el procesamiento de residuos metálicos en este trabajo, probablemente es el proceso más sencillo, que consiste en fundir metales previamente separados y derretirlos en grandes hornos. Aunque el requerimiento energético es alto, sigue siendo menor que obtener los mismos metales a partir de su materia prima. Posteriormente, la purificación se lleva a cabo comúnmente por electrólisis o simple separación magnética para eliminar las imperfecciones presentes en el nuevo material [44].

### **2.2.3 Tecnologías de procesamiento de residuos de papel**

La tecnología utilizada para reciclar papel depende principalmente del tipo de papel a reciclar. Por ejemplo, la tecnología libre de agua es una tecnología relativamente reciente, y aún no se ha alcanzado todo su potencial, por lo que aún no es posible reciclar todo tipo de papel con esta tecnología [45], además de ser altamente exigente en términos de energía eléctrica. Por otro lado, el reciclaje de papel utilizando agua se puede utilizar para todo tipo de papel y energéticamente es mucho más económico que utilizar tecnología libre de agua. Si bien implica el uso de grandes cantidades de recursos hídricos, es más atractivo desde el punto de vista económico debido al bajo costo asociado.

### **2.2.4 Tecnologías de procesamiento de residuos de vidrio.**

El reciclaje de vidrio puede ser controvertido por lo costoso que es el proceso y facilidad con la que se fragmenta el material, por lo que la dificultad de su correcta separación es alta y lleva a un bajo potencial económico [46]. Aunque desde un punto de vista económico no es atractivo, su reciclaje es conveniente desde un punto de vista ecológico. La tecnología a utilizar es la de refundición por la sencillez de su proceso y su eficiencia.

### **2.2.5 Tecnologías de procesamiento de desechos plásticos**

Los plásticos tienen un enorme potencial como fuente de productos químicos y energía. La revaloración de este tipo de residuos ha sido una de las más estudiadas [47]. El método más común para el reciclaje de residuos plásticos es el reciclaje mecánico [48]. Este proceso normalmente incluye la recolección, clasificación, lavado y trituración del material. Los pasos pueden ocurrir en un orden diferente, varias veces o no ocurrir en absoluto, según

los orígenes y la composición de los desechos [49]. El reciclaje químico es especialmente útil para las mezclas de plástico que son difíciles de separar o cuando la separación es costosa. Esta técnica consiste en convertir polímeros en pequeñas moléculas para la producción de nuevos combustibles mediante un proceso termoquímico gracias a su alto contenido en hidrocarburos [49]. Una alternativa adicional al reciclaje químico es la producción de nanotubos mediante pirólisis catalítica. Este tipo de proceso es novedoso y produce derivados de alto valor, aunque también requiere grandes inversiones [50].

### **2.2.6 Tecnologías de procesamiento de desechos médicos**

Siguiendo la estrategia propuesta por Ilyas et al. [51], es conveniente utilizar diferentes tecnologías para el tratamiento de residuos médicos, las cuales son descritas a continuación:

- Tratamiento por incineración: Consiste en incinerar la basura a alta temperatura entre 800 y 1200 grados centígrados, lo que mata al patógeno y destruye el 90 por ciento de la materia orgánica presente. Como se podría suponer, esta forma de tratamiento consume mucha energía y emite muchos contaminantes a la atmósfera.

- Tratamiento químico: Este tratamiento se basa en tratamientos de desinfección, que se emplean comúnmente como pretratamiento en los residuos de COVID-19 y luego es seguido por una trituración mecánica. Este enfoque tiene buenos rendimientos, acción rápida y un amplio espectro de esterilización que puede matar el patógeno y los microorganismos presentes, así como destruir las esporas bacterianas [52].

- Tratamientos alternativos: Los tratamientos alternativos propuestos en este artículo son principalmente dos, los basados en técnicas de pirólisis a alta temperatura y los basados en el uso de microondas en rangos de temperatura media.

Cualquiera de los tratamientos descritos anteriormente busca reducir el riesgo para la salud presente en los desechos médicos.

### **2.2.7 Tecnologías de procesamiento de residuos orgánicos**

Los residuos orgánicos se han vuelto de especial interés a nivel mundial debido a su alto potencial para la producción de energía y combustibles de forma sostenible [53]. Para este tipo de residuos se presentan tres alternativas de conversión de residuo a energía:

incineración, pirólisis, gasificación y una opción alternativa para convertir los residuos orgánicos en composta. La incineración de residuos orgánicos puede aprovechar la energía contenida en los residuos orgánicos, sin embargo, aumenta la generación de  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  y otras emisiones tóxicas para los humanos. En comparación, el proceso de pirólisis consiste en la degradación térmica de sustancias sin necesidad de que se produzcan reacciones de combustión, lo que se traduce en un menor impacto ambiental, aunque su eficiencia energética es menor que la incineración [54]. La gasificación convierte el residuo en gas combustible mediante un agente gasificante, lo que permite aprovechar el potencial energético de este gas generado, este proceso genera muy bajas emisiones en comparación con la combustión de carbón convencional [55]. Sin embargo, los rendimientos obtenidos y las características de los gases producidos en la gasificación dependen principalmente de las condiciones presentes en la reacción (temperatura, presión, tiempo de reacción) por lo que es un proceso más complejo que los anteriormente mencionados [56]. Como alternativa a los tratamientos energéticos, es posible generar composta a partir de residuos orgánicos, mediante la degradación biológica de la materia orgánica. Este proceso es amigable con el medio ambiente, aunque produce emisiones de dióxido de carbono, estas emisiones dependen principalmente del tipo de residuo y su composición. La producción de composta de alta calidad a partir de RSU puede requerir mucha energía debido al uso de maquinaria pesada que genera emisiones de dióxido de carbono [57]. Sin embargo, el uso de composta puede reducir la necesidad de fertilizantes y plaguicidas químicos, lo que implica la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas con la producción agrícola [58].

### **2.2.8 Máquinas de aprendizaje para la predicción de residuos**

Las máquinas de aprendizaje pertenecen a un campo multidisciplinario que abarca la informática, teoría de probabilidad, estadística, teoría aproximada y compleja, sus teorías y métodos han sido ampliamente utilizados para resolver problemas complejos en aplicaciones de ingeniería. En general, los algoritmos de máquinas de aprendizaje se han utilizado ampliamente en la gestión de residuos sólidos, desde la generación hasta su recolección y transporte [59]. Por otra parte, las máquinas de aprendizaje también han sido integradas en varios procesos de eliminación de residuos tales como vertederos, compostaje e incineración para ayudar a la recuperación de energía y tratamiento de gas, que puede ayudar a lograr el desarrollo sostenible a través de la reducción de desechos y la reutilización de estos [60].

## Capítulo 3. Metodología

El planteamiento de los problemas de optimización presentados en este trabajo se representa mediante superestructuras que permiten describir de manera precisa las diferentes y posibles configuraciones del proceso seleccionado. En el presente capítulo se abordan los métodos y herramientas usadas para resolver cada problema, así como también el modelado matemático referente a cada uno.

### 3.1 Metodología propuesta para la distribución de vacunas

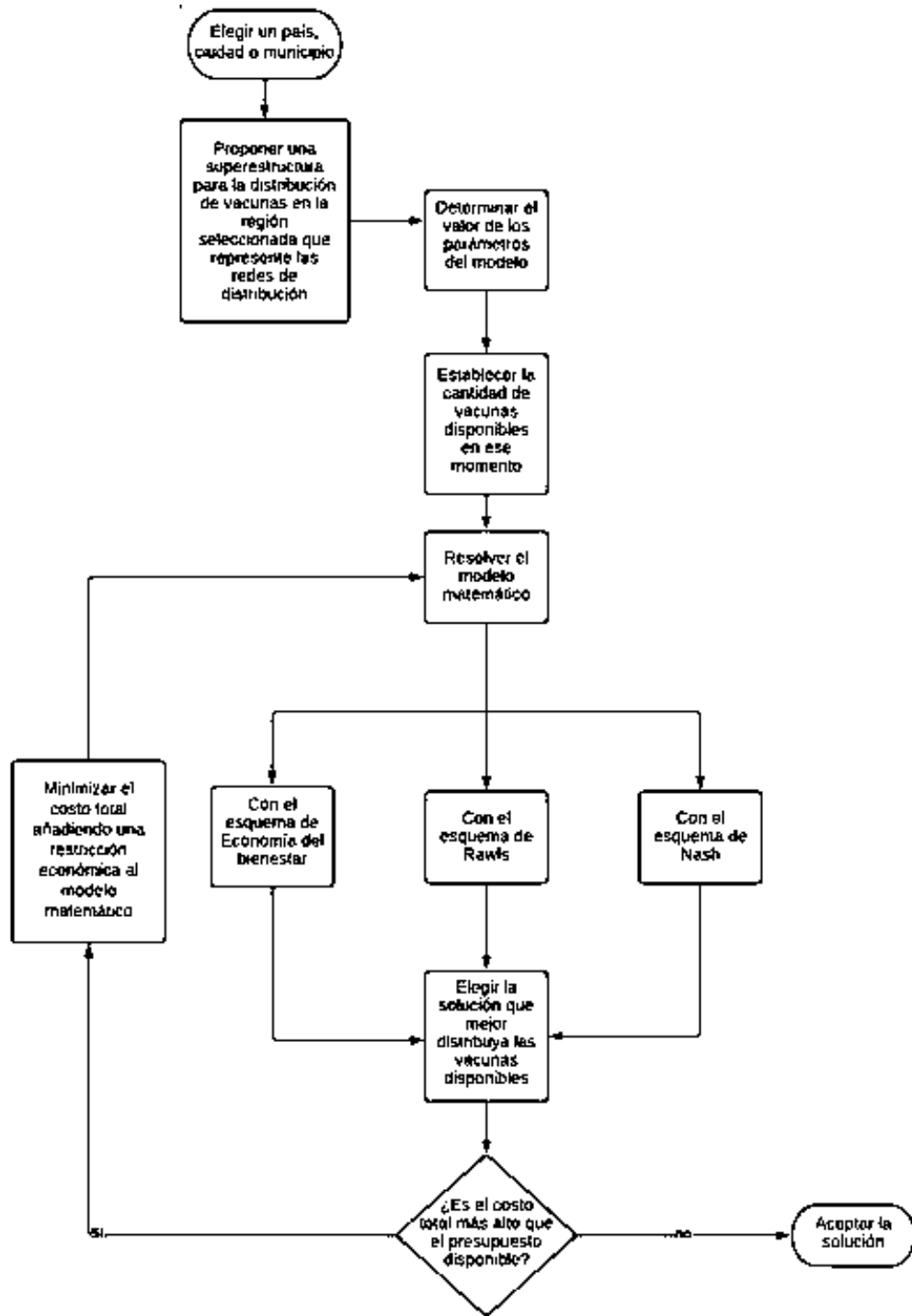
El problema consiste en encontrar una solución óptima para tratar de satisfacer las demandas de vacunas en un escenario de escasez siguiendo las condiciones establecidas por un esquema de optimización, lo cual será abordado de la siguiente manera:

- Estableciendo el número total de vacunas disponibles para el país.
- Variando los porcentajes de vacunas compradas entre los diferentes fabricantes.
- Estableciendo la cantidad de dosis requeridas por persona y por tipo de vacuna.
- Considerando los comportamientos sociales que inciden en la correcta distribución de las vacunas, como la corrupción y la delincuencia.
- Priorizando los estados con mayor nivel de riesgo en el semáforo epidemiológico.

Se utilizarán tres esquemas de distribución para tratar de encontrar la mejor solución al problema establecido:

- Economía del bienestar
- Esquema de Rawls
- Esquema de Nash

En la **Figura 3.1** se muestran los pasos para establecer y resolver este problema.



**Figura 3.1.** Enfoque propuesto para resolver el problema de distribución de vacunas



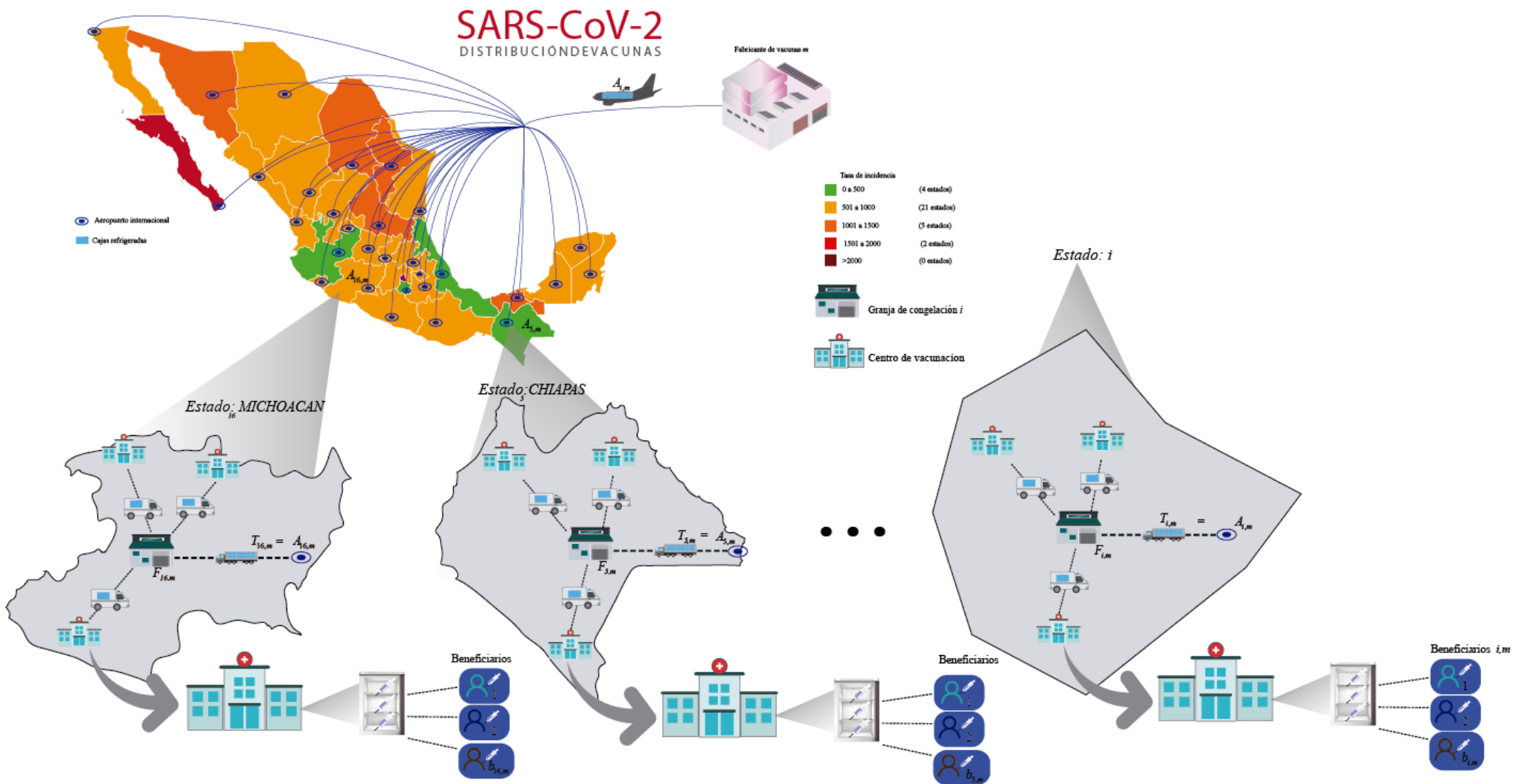
Cada esquema de distribución debe resolverse utilizando los mismos criterios. Finalmente, se analizaron 3 escenarios propuestos basados en las diferentes capacidades de producción de cada fabricante y en las distintas capacidades de inversión del país, variando en cada escenario la intensidad de la escasez de vacunas, la capacidad de inversión, la capacidad de fabricación de los distintos tipos de vacunas, la idea es que exista un responsable central de la toma de decisiones que se encargue de interactuar y coordinar a las diferentes partes interesadas involucradas. En el caso específico de México, el gobierno es el tomador de decisiones central que debe decidir entre esquemas de distribución dependiendo del escenario.

### **3.1.1 Ubicación del proyecto para la distribución de vacunas**

El problema abordado consiste en la planificación estratégica para la distribución óptima de vacunas bajo varios escenarios con diferentes condiciones. En este trabajo se presenta una formulación de optimización que utiliza esquemas de justicia para encontrar tales asignaciones. Se incluyen los siguientes esquemas: los enfoques de economía del bienestar, Nash y Rawlsiano. México fue tomado como caso de estudio para este trabajo, en particular la distribución entre sus estados. Tenga en cuenta que la formulación también se puede utilizar para la asignación entre ciudades o municipios. Los 32 estados del país fueron considerados como los interesados, donde se propusieron diferentes escenarios de disponibilidad de diferentes tipos de vacunas. Se incluyeron diferentes parámetros que son característicos de cada estado considerando también sus respectivos factores de pérdida relacionados con la corrupción y la delincuencia, así como su respectivo color en el semáforo COVID-19. La tasa de casos, las camas disponibles y la tasa de muerte por COVID-19 son algunos de los parámetros involucrados. Es fundamental tener en cuenta estos valores para orientar la asignación de vacunas. El modelo resultante se basa en la superestructura ilustrada en la **Figura 3.2**. La solución al problema pasa por encontrar las vacunas asignadas óptimas para cada estado a través de diferentes esquemas de distribución, minimizando los costos asociados obteniendo soluciones Pareto útiles para la toma de decisiones utilizando interacciones costo-satisfacción. El modelo es general y se puede aplicar a diferentes estudios de caso modificando los parámetros. Además de considerar los estados de México para el caso de estudio, los municipios también pueden participar. Por otro lado, los países podrían

incluirse en el análisis para identificar la asignación mundial de posibles vacunas.

En cuanto al caso de estudio, se utilizó información del gobierno mexicano y otras referencias para los diferentes parámetros. Los datos relacionados con COVID-19, como la tasa de casos o la tasa de mortalidad, fueron tomados de trabajos previos de Munguía-López y Ponce-Ortega [10].



**Figura 3.2.** Superestructura propuesta para la distribución de vacunas entre los diferentes estados de México (Semáforo COVID consultado el 23 de noviembre del 2020)

### 3.1.2 Formulación del modelo matemático de distribución

La formulación del modelo involucra diferentes balances de materia basados en la distribución de vacunas mostrada en la **Figura 3.2**. Seleccionando los principales parámetros que influyen en la priorización de un estado sobre otro, como los sectores de la población afectados por enfermedades autoinmunes o la población perteneciente a la tercera edad. Además, se consideran factores ajenos al sector médico que pueden provocar una disminución en el número de beneficiarios totales, como el factor de pérdida asociado a las altas tasas de corrupción y delincuencia en algunos estados.

El objetivo es maximizar el número de beneficiarios por estado y minimizar (simultáneamente) los costos asociados con el costo unitario de las vacunas, el almacenamiento y el transporte de las vacunas. Se utilizan esquemas de distribución para obtener un conjunto de soluciones óptimas según el escenario propuesto.

La nomenclatura utilizada en la formulación del modelo se presenta en la **Tabla 3.1**.

**Tabla 3.1.** Nomenclatura usada en la formulación de distribución de vacunas.

**Parámetros**

AB	Presupuesto disponible	$p_i$	Población de cada estado $i$
$B_i^{av}$	Camas disponibles en cada estado $i$ para todas las enfermedades	$r_i$	Tasa de casos de COVID-19 de cada estado $i$
$c_i$	Umbral de cada estado $i$ (se refiere a la cantidad mínima de población que debe recibir una vacuna)	$s_i^a$	Estadía promedio en días de pacientes en cada estado $i$ para todas las enfermedades
$CI_i$	Tasa de incidencia delictiva por estado	$VT_m$	Total de vacunas disponibles por tipo de vacuna $m$
$\overline{CI}_i$	Tasa promedio de incidencia delictiva por estado	<b>Variables</b>	
$d_i^p$	Pacientes dados de alta en cada estado $i$ por año para todas las enfermedades	$b_{i,m}$	Beneficiarios para cada estado $i$ por tipo de vacuna $m$
$d^y$	Días en el año	$CPV_m$	Costos por vacuna tipo $m$
$f_i^{dm}$	Prevalencia de diabetes mellitus diagnosticada en adultos en cada estado $s$	$CTAR_{i,m}$	Costo de transporte de aviones para cada estado $i$ por tipo de vacuna $m$
$f_i^e$	Fracción de la población anciana en cada estado $i$	$CT_{i,m}$	Costo unitario de refrigeración $m$ para camiones de cada estado $i$ por tipo de vacuna $m$
$f^h$	Fracción de pacientes con COVID-19 que requieren hospitalización	$CTT_{i,m}$	Costo unitario de transporte de camiones para cada estado $i$ por tipo de vacuna $m$
$f_i^{hy}$	Prevalencia de hipertensión en adultos en cada estado $i$	$nh$	Variable para denotar la función objetivo en el esquema de Nash
$f_i^{ob}$	Prevalencia de obesidad en adultos en cada estado $i$	$RCA_{i,m}$	Costo unitario de refrigeración para aviones para cada estado $i$ por tipo de vacuna $m$
$\dot{l}^o$	Índice de ocupación	$rw$	Variable para denotar la función objetivo en el esquema de justicia Rawlsiano
$l_i$	Demanda de camas de hospital para pacientes con COVID-19 que no se pueden satisfacer	$SCF_{i,m}$	Costos unitarios de almacenamiento para granjas de congelación para cada estado $i$ por tipo de vacuna $m$
$M_i$	Tasa de mortalidad por COVID-19	$sw$	Variable para denotar la función objetivo en el régimen de bienestar social
$M^{dm}$	Mortalidad de pacientes con COVID-19 con diabetes mellitus	$TC$	Costos totales
$M^e$	Mortalidad de pacientes ancianos con COVID-19	$V_{i,m}$	Vacunas asignadas para cada estado $i$ por tipo de vacuna $m$
$M^{hy}$	Mortalidad de pacientes con COVID-19 con hipertensión		
$M^{ob}$	Mortalidad de pacientes con COVID-19 con obesidad		

$w_i$	Variable de ponderación para cada estado $i$	$\Phi_i$	Variable de satisfacción para cada estado $i$
-------	--	----------	---

### 3.1.2.1 Restricciones para un diseño factible

La asignación de recursos médicos implica un cierto número de restricciones, estas permiten establecer los límites para la asignación de recursos por cada estado. Por tanto, se evita una asignación excesiva para cualquier estado y se establece un mínimo de vacunas que se deben asignar para cada estado. La superestructura propuesta para representar el sistema mencionado se muestra en la **Figura 3.2**. Los índices utilizados son:  $i$  representa cada estado y  $m$  representa el tipo de vacuna. Se incluyen las siguientes restricciones para la asignación:

$$\sum_{i \in I} v_{i,m} \leq VT_m, \quad \forall m \in M \quad (1)$$

$$\sum_{m \in M} v_{i,m} \leq p_i, \quad i \in I \quad (2)$$

$$\sum_{m \in M} v_{i,m} \geq c_i, \quad i \in I \quad (3)$$

$$\sum_{m \in M} b_{i,m} \leq p_i, \quad i \in I \quad (4)$$

La primera de estas restricciones especifica que la suma de las vacunas enviadas a cada estado  $i$  ( $v_{i,m}$ ) para cada tipo de vacuna  $m$  debe ser menor o igual que el total de vacunas disponibles ( $VT_m$ ). Además, la Eq. (2) especifica que las vacunas enviadas a cada estado  $i$  deben ser inferiores o iguales a la población ( $p_i$ ) para evitar desperdicios. Del mismo modo, la Eq. (3) establece que las vacunas enviadas a cada estado  $i$  deben ser al menos iguales a un umbral mínimo ( $c_i$ ). Este umbral mínimo es un parámetro que considera a los pacientes que requerirían hospitalización, pero no recibirán este servicio por falta de recursos médicos. La estimación de este parámetro se presenta en la subsección siguiente. Tomando en cuenta que cuando la restricción (2) está activa, las vacunas máximas se asignan a cada estado. Por otro lado, cuando la restricción (3) está activa, las vacunas mínimas se asignan a cada estado. Por último, la Eq. (4) establece que los beneficiarios (personas que reciben la vacuna) ( $b_{i,m}$ ) deben ser siempre iguales o inferiores a la población ( $p_i$ ).

### 3.1.2.2 Establecimiento de parámetros

Debido a la gran varianza presente en cada estado en cuanto a la población perteneciente a grupos vulnerables, es necesario establecer parámetros estrechamente relacionados con el modelo de distribución para estimar, cuantificar y priorizar en función de las diferencias existentes en cada estado. El cálculo de estos parámetros se realiza de la siguiente manera.

$$c_i = l_i + p_i r_i (M_i + M^e f_i^e + M^{ob} f_i^{ob} + M^{hy} f_i^{hy} + M^{dm} f_i^{dm}), i \in I \quad (5)$$

$$l_i = p_i r_i f^h + \frac{d_i^p s_i^a}{d^y t^o} - B_i^{av}, i \in I \quad (6)$$

$$\gamma_i = \frac{\overline{CI}_i}{2}, i \in I \quad (7)$$

Primero, estimamos el umbral mínimo  $c_i$  (mencionado anteriormente en la Ec. (3)) como se presenta en la Ec. (5). Aquí, se utilizan los siguientes parámetros. Se consideran los parámetros relacionados con la tasa de mortalidad por COVID-19 ( $M_i$ ) y los grupos más vulnerables a COVID-19. Estos grupos incluyen a los ancianos, la población con una afección subyacente como la obesidad, la hipertensión y la diabetes mellitus. Específicamente, está involucrada la tasa de mortalidad por COVID-19 en estos grupos ( $M^e, M^{ob}, M^{hy}, M^{dm}$ ) y la fracción de la población que forma parte de estos grupos vulnerables ( $f_i^e, f_i^{ob}, f_i^{hy}, f_i^{dm}$ ). Además, se considera la tasa de casos de COVID-19 por estado ( $r_i$ ). Algunos de estos parámetros se pueden encontrar en la Tabla 3.2. Los parámetros completos se pueden consultar en el trabajo de Munguía-López y Ponce-Ortega [13]. Tomando en cuenta que la demanda de camas de hospital para pacientes con COVID-19 que no se pueden satisfacer también se considera y se denota con  $l_i$  (este parámetro se estima como se presenta en la Ec. (6)). Cabe señalar que el umbral mínimo  $c_i$  varía en función de los parámetros de cada estado.

Como se mencionó anteriormente, la demanda de camas de hospital para pacientes con COVID-19 se estima como se muestra en la Ec. (6). Aquí, el primer término se refiere a la fracción de pacientes con COVID-19 que requirieron hospitalización, el segundo término representa las camas que se requieren por año en cada estado para otras enfermedades y el

tercer término son las camas disponibles por estado. Las camas que se requieren por año en cada estado para otras enfermedades se estimaron utilizando la fórmula de Brigdman [9].

Simultáneamente, existen factores ajenos al sector médico que pueden afectar la correcta distribución de las vacunas, como los altos niveles de inseguridad y corrupción existentes en diferentes estados. Calcular un valor para este parámetro puede resultar especialmente complicado ya que implica realizar un análisis social complejo. Para simplificar esto, es posible estimar estadísticamente un factor de pérdidas como se presenta en la Ec. (7). La fracción de pérdidas ( $\gamma_i$ ) es un parámetro conocido entre el intervalo 0-1. Este parámetro se puede estimar utilizando la tasa de incidencia delictiva por estado ( $CI_i$ ) que incluye hurto de bienes o dinero, extorsión, hurto de mercadería en tránsito, daños a instalaciones, maquinaria o equipo, hurto total o parcial de un vehículo. El valor de este parámetro para cada estado durante 8 años se puede encontrar en la Tabla 3.3. Para obtener un valor representativo de la fracción de pérdidas, se considera la fracción promedio de delitos por estado ( $\overline{CI}_i$ ) dividida por dos como se muestra en la Ec. (7). Los valores resultantes para este parámetro se pueden encontrar en la Tabla 3.4.



**Tabla 3.2.** Parámetros para cada estado incluyendo población ( $p_i$ ), tasa de casos de COVID-19 ( $r_i$ ) y tasa de mortalidad de COVID-19 ( $M_i$ ), así como camas disponibles ( $B^{av}_i$ ), pacientes dados de alta ( $d^p_i$ ), y estancia media de los pacientes en días ( $s^a_i$ ) para todas las enfermedades. La información relacionada con COVID-19 se basa en los casos notificados por DGE [61] y SINAISCAP [62].

Estados por población		$p_i$	$r_i$	$M_i$	$B^{av}_i$	$d^p_i$	$s^a_i$	$\rho_p$
1	Estado de Mexico	17,42,790	0.0001640	0.073	8,356	303,939	4.3	760
2	Ciudad de Mexico	9,018,645	0.0005300	0.067	15,632	249,752	5.7	6,163
3	Veracruz	8,539,862	0.0000602	0.086	4,999	163,327	3.5	112
4	Jalisco	8,409,693	0.0000388	0.077	6,460	176,843	4.1	106
5	Puebla	6,604,451	0.0000940	0.135	4,012	118,039	4.4	192
6	Guanajuato	6,228,175	0.0000384	0.092	3,657	158,514	3.7	201
7	Chiapas	5,730,367	0.0000288	0.042	2,260	108,258	3.3	76
8	Nuevo Leon	5,610,153	0.0000558	0.038	4,077	54,699	3.7	90
9	Michoacán	4,825,401	0.0000576	0.130	2,648	100,186	2.6	81
10	Oaxaca	4,143,593	0.0000314	0.138	2,352	76,420	3.5	44
11	Chihuahua	3,801,487	0.0000855	0.212	2,915	81,911	4.1	15
12	Guerrero	3,657,048	0.0000733	0.183	2,075	78,186	3.2	56
13	Tamaulipas	3,650,602	0.0000844	0.058	2,977	77,266	3.8	44
14	Baja California	3,634,868	0.0004110	0.142	2,153	40,627	4.5	53
15	Coahuila	3,218,720	0.0001150	0.111	2,915	39,205	3.7	21
16	Sinaloa	3,156,674	0.0002600	0.162	2,382	54,142	3.9	53
17	Hidalgo	3,086,414	0.0000784	0.112	1,367	56,521	4.2	148
18	Sonora	3,074,745	0.0000657	0.109	2,894	90,264	2.9	16
19	San Luis Potosi	2,866,142	0.0000342	0.071	2,021	60,832	4	46
20	Tabasco	2,572,287	0.0003660	0.124	1,583	81,367	2.9	97
21	Queretaro	2,279,637	0.0000561	0.078	881	51,749	3.2	203
22	Yucatan	2,259,098	0.0001790	0.064	1,800	53,173	4.3	59
23	Morelos	2,044,058	0.0001360	0.112	1,047	44,348	2.7	404
24	Durango	1,868,996	0.0000310	0.104	1,542	48,582	2.6	15
25	Quintana Roo	1,723,259	0.0004130	0.153	1,030	40,320	3.6	42
26	Zacatecas	1,666,426	0.0000420	0.100	999	38,496	3.4	22
27	Aguascalientes	1,434,635	0.0001290	0.011	966	39,160	3.3	254
28	Tlaxcala	1,380,011	0.0001300	0.101	714	54,655	2.2	336
29	Nayarit	1,288,571	0.0000559	0.167	714	19,665	2.8	44
30	Campeche	1,000,617	0.0000869	0.196	790	24,245	3.9	16

<b>31</b>	Baja California Sur	804,708	0.0003740	0.053	695	19,639	3.2	11
<b>32</b>	Colima	785,153	0.0000331	0.115	649	19,049	3.5	130

**Tabla 3.3.** Tasa de incidencia delictiva por la entidad federativa de ocurrencia por cada cien mil habitantes [63].

Estado	Casos por cada 100,000 habitantes ( $CI_i$ )								
	2010 /1	2011 /2	2012 /3	2013 /4	2014	2015	2016	2017	2018
<b>México</b>	32,958	40,416	56,752	93,003	83,566	56,835	62,751	65,381	51,520
<b>Ciudad de México</b>	44,055	40,790	49,198	51,786	59,545	52,718	49,913	68,954	69,716
<b>Veracruz</b>	19,867	22,579	23,411	28,101	20,832	22,157	19,892	18,300	25,350
<b>Jalisco</b>	32,980	29,351	49,083	47,278	43,076	49,317	41,874	43,023	40,543
<b>Puebla</b>	23,946	29,350	27,318	31,662	32,690	27,530	31,331	42,343	37,647
<b>Guanajuato</b>	23,365	26,705	34,391	34,110	40,737	33,154	33,384	29,231	38,067
<b>Chiapas</b>	15,028	13,663	12,827	19,215	19,160	16,687	20,055	20,464	19,409
<b>Nuevo León</b>	38,136	28,516	37,076	32,552	28,720	26,221	32,819	32,407	27,805
<b>Michoacán</b>	15,469	24,346	24,362	25,126	26,340	23,876	26,366	22,624	22,999
<b>Oaxaca</b>	25,193	20,991	18,009	20,749	29,073	24,961	27,897	22,152	26,221
<b>Chihuahua</b>	41,903	30,562	35,952	31,669	24,295	31,274	34,920	28,857	28,622
<b>Guerrero</b>	33,467	27,040	33,762	35,366	42,690	53,875	47,392	45,006	43,051
<b>Tamaulipas</b>	27,083	20,645	25,255	19,417	33,414	21,363	23,318	23,706	25,368
<b>Baja California</b>	31,791	29,446	39,297	57,066	56,632	32,758	51,286	43,921	42,725
<b>Coahuila</b>	29,279	26,558	17,870	25,451	18,318	24,800	25,215	25,299	24,813
<b>Sinaloa</b>	34,254	29,838	33,231	30,287	29,139	22,750	23,257	28,748	29,507
<b>Hidalgo</b>	22,662	25,106	21,874	23,468	23,211	21,159	23,564	22,135	25,987
<b>Sonora</b>	46,774	39,029	34,126	31,155	26,384	40,466	42,624	39,759	50,861
<b>San Luis Potosí</b>	30,827	33,878	35,124	39,558	41,384	25,838	25,867	31,673	32,342
<b>Tabasco</b>	32,185	21,357	24,368	32,037	29,508	30,409	31,664	45,604	36,546
<b>Querétaro</b>	19,516	22,860	27,197	27,975	31,572	30,991	26,860	35,395	32,756
<b>Yucatán</b>	37,647	16,599	22,945	23,728	31,857	25,862	23,736	24,098	26,462
<b>Morelos</b>	28,491	25,775	35,750	36,524	43,584	43,419	43,749	48,528	45,312
<b>Durango</b>	23,803	21,540	27,631	22,512	30,080	25,640	23,283	22,566	22,586
<b>Quintana Roo</b>	41,093	37,725	40,279	35,245	41,381	35,639	32,862	33,269	33,243
<b>Zacatecas</b>	29,688	18,772	20,506	27,290	30,058	21,501	24,160	34,642	26,670
<b>Aguascalientes</b>	56,089	25,511	32,368	24,711	39,453	35,457	41,254	39,912	36,500
<b>Tlaxcala</b>	26,065	22,387	18,530	26,660	33,700	30,699	27,707	33,847	40,336
<b>Nayarit</b>	31,741	28,751	26,006	26,609	32,936	21,288	26,260	33,105	23,670
<b>Campeche</b>	20,922	21,704	29,097	30,597	29,306	22,114	28,892	28,283	26,466
<b>Baja California Sur</b>	25,779	28,884	31,049	23,747	34,700	25,577	29,939	25,690	28,377
<b>Colima</b>	17,343	22,287	25,169	26,309	30,535	27,045	29,449	27,074	28,376

**Tabla 3.4.** Fracción de pérdidas por estado según la tasa de incidencia delictiva.

<b>NUMERO</b>	<b>ESTADO</b>	$\gamma_i$
1	México	0.302
2	Ciudad de México	0.270
3	Veracruz	0.111
4	Jalisco	0.209
5	Puebla	0.158
6	Guanajuato	0.163
7	Chiapas	0.087
8	Nuevo León	0.158
9	Michoacán	0.118
10	Oaxaca	0.120
11	Chihuahua	0.160
12	Guerrero	0.201
13	Tamaulipas	0.122
14	Baja California	0.214
15	Coahuila	0.121
16	Sinaloa	0.145
17	Hidalgo	0.116
18	Sonora	0.195
19	San Luis Potosí	0.165
20	Tabasco	0.158
21	Querétaro	0.142
22	Yucatán	0.129
23	Morelos	0.195
24	Durango	0.122
25	Quintana Roo	0.184
26	Zacatecas	0.130
27	Aguascalientes	0.184
28	Tlaxcala	0.144
29	Nayarit	0.139
30	Campeche	0.132
31	Baja California Sur	0.141
32	Colima	0.130

### 3.1.2.3 Balances en la red de distribución

La serie de pasos que siguen las vacunas desde la fabricación hasta la entrega a los miembros de la población objetivo es de vital importancia, considerando los cuidados especiales que requieren algunos tipos de vacunas (como el transporte y almacenamiento a muy bajas temperaturas). Los balances en la red de distribución propuestos en la superestructura de la **Figura 3.2** se detallan a continuación:

$$v_{i,m} = A_{i,m}, \quad \forall i \in I, \forall m \in M \quad (8)$$

$$F_{i,m} = A_{i,m} - v_{i,m}^{lost}, \quad i \in I, \forall m \in M \quad (9)$$

$$v_{i,m}^{lost} = \gamma_{i,m} A_{i,m}, \quad i \in I, \forall m \in M \quad (10)$$

$$F_{i,m} = b_{i,m}, \quad i \in I, \forall m \in M \quad (11)$$

$$\phi_i = \frac{\sum_{m \in M} b_{i,m}}{p_i}, \quad i \in I \quad (12)$$

La Ec. (8) especifica que el número total de vacunas enviadas es igual a cada tipo de vacuna ( $m$ ) transportada por aviones ( $A_{i,m}$ ). De manera similar, la Ec. (9) especifica que las vacunas transportadas se almacenan en granjas congeladoras ( $F_{i,m}$ ) (estas granjas almacenan todo tipo de vacunas). Sin embargo, las vacunas transportadas en camiones refrigerados pueden sufrir pérdidas (relacionadas con los índices de alto riesgo existentes en algunas regiones). Se considera esta posible pérdida de vacunas ( $v_{i,m}^{lost}$ ), donde la Ec. (10) establece cómo estimar esta variable. Finalmente, la Ec. (11) establece que las vacunas almacenadas en granjas congeladoras se entregan a los miembros de la población objetivo (Beneficiarios ( $b_{i,m}$ )). El objetivo principal de este manuscrito es brindar un esquema de distribución equitativa de las vacunas disponibles, por lo que, cuando no es posible satisfacer todas las demandas de las vacunas, es útil establecer un índice de satisfacción ( $\phi_i$ ) el cual se define en la Ec. (12) Este índice debe estar entre el intervalo 0-1, donde 1 representa el nivel máximo

de satisfacción y 0 representa el nivel mínimo de satisfacción (los resultados se presentan utilizando este índice de satisfacción).

### 3.1.2.4 Esquemas de distribución

La primera función objetivo cambia según el esquema de distribución utilizado para resolver el modelo, que también cambia el tipo de modelo a resolver. Para los esquemas de bienestar social y justicia Rawlsiana, los modelos resultantes son programas lineales (LP). Por otro lado, para el esquema de Nash, el modelo es un programa no lineal (NLP). Los esquemas de distribución y su respectiva función objetivo se establecen como se muestra a continuación:

$$\max sw \quad (13)$$

$$sw = \sum_{i \in I} \left( \sum_{m \in M} b_{i,m} \right) w_i \quad (14)$$

$$\min rw \quad (15)$$

$$-\left( \sum_{m \in M} b_{i,m} \right) w_i \leq rw, \quad i \in I \quad (16)$$

$$\max nh \quad (17)$$

$$nh = \sum_{i \in I} w_i \log \left( \sum_{m \in M} b_{i,m} \right) \quad (18)$$

Las ecuaciones (13), (15) y (17) establecen las funciones objetivo para los esquemas de bienestar social, Rawlsiano y Nash, respectivamente. La Eq. (14) establece la variable para el esquema de economía social ( $sw$ ). Bajo este esquema la distribución se da maximizando la suma de las asignaciones de los beneficiarios. En la Ec. (16), la variable Rawlsiana ( $rw$ ) se establece para relacionar el número de beneficiarios según la teoría de Rawls. Bajo este esquema, la distribución se da maximizando los beneficiarios asignados más pequeños. Finalmente, en la Ec. (18) se establece la variable perteneciente al esquema de justicia de Nash ( $nh$ ), donde se implementa el uso de logaritmos para eliminar las

prioridades generadas por los diferentes tamaños de escala de las distintas partes interesadas. Aquí, la distribución se da maximizando la suma de los logaritmos de las asignaciones de los beneficiarios.

En las ecuaciones anteriores se observa una variable adicional ( $w_i$ ), esta variable es una variable de ponderación, la cual depende únicamente del riesgo epidemiológico mostrado en la **Figura 3.2**, donde el riesgo cambia según el color de cada estado. Cabe señalar que estos pesos agregan una prioridad que no depende de los diferentes sectores de la población afectados por diferentes enfermedades, solo depende del riesgo epidemiológico presente en cada estado. Los valores que puede tomar esta variable se muestran en la **Tabla 3.5**. Cabe destacar que la separación de estados por su color de tasa de incidencia permite priorizar aquellos estados con altos niveles de personas infectadas.

**Tabla 3.5.** Valores de la variable de peso basados en el semáforo COVID-19 [64].

<i>Color del semaforo COVID-19</i>	$w_i$
<i>Verde</i>	1
<i>Amarillo</i>	2
<i>Naranja</i>	3
<i>Rojo</i>	4
<i>Cafe</i>	5

### 3.1.2.5 Costos asociados a la distribución de vacunas

La implementación de la función de costos permite comparar las diferentes posibilidades entre la disponibilidad de la vacuna y la disponibilidad de inversión (modelo multiobjetivo). Así, es posible obtener soluciones de Pareto óptimas, maximizando las asignaciones de los beneficiarios (función objetivo de los esquemas de distribución) y minimizando los costos (función objetivo de costo total). La función de costo propuesta considera el costo de transporte, el costo de almacenamiento y el costo asociado con cada tipo de vacuna. Las ecuaciones que permiten implementar los costos al modelo se muestran a continuación:

$$TC = \text{transportation costs} + \text{storage costs} + \text{vaccine costs} \quad (19)$$

$$TC \leq AB \quad (20)$$

$$\text{transportation costs} = \sum_{m \in M} \sum_{i \in I} (RCA_{i,m} + CTAR_{i,m} + CT_{i,m} + CTT_{i,m}) A_{i,m} \quad (21)$$

$$\text{storage costs} = \left( \sum_{i \in I} \sum_{m \in M} SCF_{i,m} F_{i,m} \right) \quad (22)$$

$$\text{vaccine costs} = \left( \sum_{m \in M} CPV_m VT_m \right) \quad (23)$$

La primera de estas ecuaciones (Ec. (19)) permite calcular los costos totales ( $CT$ ). La Ec. (20) limita estos costos en función de la capacidad de inversión disponible ( $AB$ ) que es un parámetro. Cabe señalar que la Ec. (20) funciona como la segunda función objetivo del modelo (para asegurar que la compra y los gastos asociados no excedan el presupuesto disponible de una región). Las ecuaciones (21), (22) y (23) se utilizan para calcular los costos totales de transporte, almacenamiento y vacunas, respectivamente. Los costos de transporte están vinculados al tipo de vacuna ( $m$ ) y al estado ( $i$ ) (ya que los costos del refrigerante utilizado para cada vacuna son diferentes). La Ec. (21) especifica cómo calcular estos costos, donde  $RCA_{i,m}$  es el costo unitario de refrigeración  $m$  para aviones, es el costo unitario de transporte para aviones,  $CTAR_{i,m}$  es el costo unitario de refrigeración  $m$  para camiones y  $CT_{i,m}$  es el costo unitario de transporte para camiones. Es necesario considerar diferentes tipos de costos debido al refrigerante de cada vacuna. Además, en la Ec. (22) se especifica el cálculo de los costos de almacenamiento, donde  $SCF_{i,m}$  es el costo unitario de almacenamiento para las granjas de congelación. Como se mencionó anteriormente, diferentes tipos de vacunas pueden requerir diferentes refrigeradores, por lo tanto, es necesario especificarlo. Para este trabajo se considerará un mes de almacenamiento para obtener el costo unitario (ver **Tabla 3.6**). Finalmente, en la Ec. (23) se establecen los costos asociados a cada tipo de vacuna, donde  $CPV_m$  son los costos por vacuna que se pueden encontrar en la **Tabla 3.7**.

**Tabla 3.6.** Los costos de almacenamiento de las granjas de congelación por mes, por vacuna [65, 66].

	<i>Pfizer</i>	<i>AstraZeneca</i>	<i>Moderna</i>
$SCF_i(\text{Dólares por month/Vacuna}) \times 10^3$	9.681	0.421	0.420

**Tabla 3.7.** Costos de las vacunas [67].

	Pfizer	AstraZeneca	Moderna
$CPV_i(\text{Dólares por Vacuna})$	19.5	3.5	34.5

Para el caso de estudio abordado, se evaluaron los siguientes escenarios. Las cantidades de vacunas disponibles y los porcentajes relativos se establecieron con base en los datos propuestos en el comunicado del gobierno núm. 080 [37].

**Escenario 1:**

- El número total de vacunas disponibles en el mercado equivale al 33% de la población (42.000.000 vacunas).
- 40% son vacunas Pfizer; El 30% son vacunas Moderna; El 30% son vacunas contra AstraZeneca.
- Todos los tipos de vacunas requieren 2 dosis por beneficiario.
- La fracción de pérdidas se deprecia (= 0), lo que significa que no hay vacunas perdidas.
- Las variables de ponderación son 1 para todos los casos (= 1)

**Escenario 2:**

- El número total de vacunas disponibles en el mercado equivale al 33% de la población (42.000.000 vacunas).
- 40% son vacunas Pfizer; el 30% son vacunas Moderna; el 30% son vacunas AstraZeneca.



- Todos los tipos de vacunas requieren 2 dosis por beneficiario.
- Se considera la fracción de pérdidas (ver **Tabla 3.4**).
- Las variables de ponderación son 1 para todos los casos (= 1).

### **Escenario 3:**

- El número total de vacunas disponibles en el mercado equivale al 33% de la población (42.000.000 vacunas).
- 40% son vacunas Pfizer; el 30% son vacunas Moderna; el 30% son vacunas AstraZeneca.
- Todos los tipos de vacunas requieren 2 dosis por beneficiario.
- Se considera la fracción de pérdidas (ver **Tabla 3.4**).
- Las variables de ponderación se consideran para todos los casos (ver **Tabla 3.5**).

Cabe señalar que el escenario 3 es el más complejo ya que involucra tanto la fracción de pérdidas como las variables de peso.

### 3.2 Metodología propuesta para la revalorización de RSU

Para la metodología propuesta (ver **Figura 3.3**), se manejan dos tipos principales de procesos de residuos, los que están destinados a producir nuevos materiales (residuos electrónicos, metal, vidrio, plástico, papel y, como caso especial, residuos orgánicos que son convertidos en abono) y procesos que convierten los residuos en energía (residuos médicos, residuos orgánicos). La formulación del modelo matemático determinista es general y no está limitada por las tecnologías propuestas en este trabajo.



**Figura 3.3.** Representación general de la estrategia propuesta para la revalorización de los residuos.

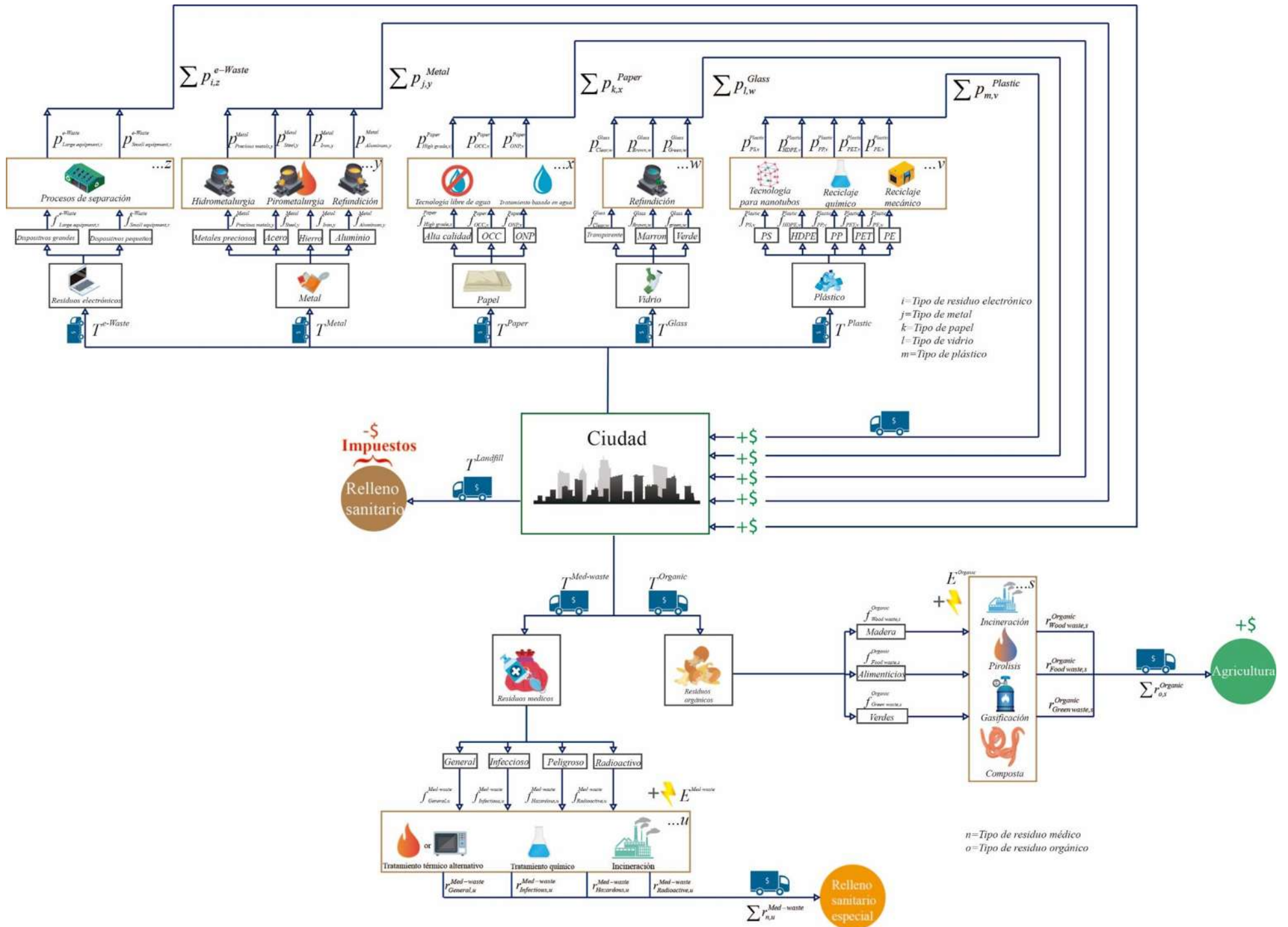


Figura 3.4. Superestructura propuesta para el manejo de residuos sólidos. 34

**Tabla 3.8.** Nomenclatura usada en la formulación de gestión de residuos.

<b>Parámetros</b>			
$A_{sub-wastetype, technology}^{wastetype}$	Costos fijos asociados al procesado de residuos	$CW_{sub-wastetype}^{wastetype}$	Sub residuos electrónicos separados
$B_{sub-wastetype, technology}^{wastetype}$	Parámetro para considerar costos variables de procesamiento	$ES$	Ventas asociadas a la producción de energía
EMPT	Ventas por ton asociadas al material electrónico	$f_{sub-wastetype, technology}^{wastetype}$	Sub-residuos a procesar
GPT	Ventas por ton asociadas al vidrio	$H^{Landfill}$	Variable booleana para la asignación de la tasa de impuestos
$Kf$	Factor de anualidad	$H_{sub-wastetype, technology}^{wastetype}$	Variable booleana de decisión para emplear o no una tecnología
MPT	Ventas por ton asociadas al metal	$h_{sub-wastetype, technology}^{wastetype}$	Variable binaria de decisión para
NPS	Ventas por ton de producción de nanotubos	$MS$	Ventas asociadas a materiales procesados
OMPT	Ventas por ton asociadas a materia orgánica	$P_{sub-wastetype, technology}^{wastetype}$	Productos obtenidos de residuos inorgánicos
OPS	Ventas por ton de producción de aceites	$PTC$	Costo de transporte de productos
PPS	Ventas por ton de producción de pellets	$r_{n,s}^{med-waste}$	Residuos médicos procesados y enviados al relleno sanitario especial
PPT	Ventas por tonelada asociadas al papel	$r_{o,s}^{organic}$	Residuos orgánicos procesados
$SC^{waste type}$	Costo de separación para cada tipo de residuo	$Revenue$	Ingresos
SPMW	Precio de venta de MWh producido	$RMTC$	Costo del transporte de material sin procesar
TCPTP	Costo por tonelada de producto transportado	$T^{waste type}$	Residuos clasificados según su tipo emplear o no una tecnología
TCPTR	Costo por tonelada de residuos transportados	$Taxes$	Impuestos
$T^I$	Límite inferior para asignación de tasa de impuestos	$Taxes^L$	Impuestos calculados con la tasa más baja
$T^{II}$	Límite superior para asignación de tasa de impuestos	$Taxes^H$	Impuestos calculados con la tasa más alta
TW	Residuos anuales generados	$TC$	Costo total
$\alpha^{wastetype}$	Fracción de tipos de residuos en TW	$Total profit$	Beneficios económicos totales
$\beta_{sub-wastetype}^{wastetype}$	Fracción de separación para sub-residuos	$Transport cost/$	Costos de transporte
$\gamma_{sub-wastetype, technology}^{wastetype, max}$	Factor de eficiencia para el procesado de residuos para cada tecnología	$Treatment cost$	Costos de tratamiento
$\delta_{sub-wastetype, technology}^{wastetype, max}$	Capacidad máxima de procesamiento para sub-residuos	$wf$	Fracción de residuos enviada al relleno sanitario
$\delta_{sub-wastetype, technology}^{wastetype, min}$	Capacidad mínima de procesamiento para sub-residuos		
<b>Variables</b>			
AS	Ventas asociadas a la agricultura		
$Cost_{sub-wastetype, technology}^{wastetype}$	Costos de procesamiento para cada tipo de residuo y tecnología		

### 3.2.1 Modelo matemático para la gestión de RSU

La formulación del modelo matemático se basa en la superestructura presentada en la **Figura 3.4**, utilizando parámetros que permiten seleccionar un proceso sobre otro cuando existe más de una alternativa para un tipo de residuo.

#### 3.2.1.1 Balance de residuos en la ciudad

Los residuos totales (TW) producidos por la ciudad por año deben separarse y clasificarse en: residuos electrónicos ( $T^{e-waste}$ ), metal ( $T^{Metal}$ ), papel ( $T^{Paper}$ ), vidrio ( $T^{Glass}$ ), plástico ( $T^{Plastic}$ ), residuos médicos ( $T^{Med-waste}$ ), y residuos orgánicos ( $T^{Organic}$ ). Estos balances se establecen de la siguiente manera:

$$T^{e-waste} = (1 - wf) TW \cdot \alpha^{e-waste} \quad (24)$$

$$T^{Metal} = (1 - wf) TW \cdot \alpha^{Metal} \quad (25)$$

$$T^{Paper} = (1 - wf) TW \cdot \alpha^{Paper} \quad (26)$$

$$T^{Glass} = (1 - wf) TW \cdot \alpha^{Glass} \quad (27)$$

$$T^{Plastic} = (1 - wf) TW \cdot \alpha^{Plastic} \quad (28)$$

$$T^{Med-waste} = (1 - wf) TW \cdot \alpha^{Med-waste} \quad (29)$$

$$T^{Organic} = (1 - wf) TW \cdot \alpha^{Organic} \quad (30)$$

$$T^{Landfill} = wf \cdot TW \quad (31)$$

Las ecuaciones anteriores permiten calcular las cantidades de residuos a procesar, donde  $\alpha^{e-waste}$ ,  $\alpha^{Metal}$ ,  $\alpha^{Paper}$ ,  $\alpha^{Glass}$ ,  $\alpha^{Plastic}$ ,  $\alpha^{Med-waste}$ ,  $\alpha^{Organic}$  son las fracciones existentes de cada residuo clasificado en la ciudad (ver **Tabla 3.9**).  $T^{Landfill}$  representa la cantidad de desperdicio total que no se puede enviar a procesamiento y  $wf$  representa la fracción del desperdicio total que no se puede enviar a procesamiento.

**Tabla 3.9.** Fracciones de separación para cada tipo de residuo.

Parámetro	Valor	Descripción	Reference
$\alpha^{e-waste}$	0.022	Fracción de residuos electrónicos presentes en los residuos totales	[68]
$\alpha^{Glass}$	0.05	Fracción de residuos de vidrio presentes en los residuos totales	[69, 70]
$\alpha^{Med-waste}$	0.28	Fracción de residuos médicos presentes en los residuos totales	[71, 72, 73]
$\alpha^{Metal}$	0.098	Fracción de residuos metálicos presentes en los residuos totales	[69,70]
$\alpha^{Organic}$	0.25	Fracción de residuos orgánicos presentes en los residuos totales	[74]
$\alpha^{Paper}$	0.212	Fracción de residuos de papel presentes en los residuos totales	[69, 70]
$\alpha^{Plastic}$	0.088	Fracción de residuos plásticos presentes en los residuos totales	[69, 70]

Posteriormente, cada tipo de residuo debe ser separado para ser procesado por las diferentes tecnologías disponibles, donde  $i$  representa el tipo de residuo electrónico,  $j$  tipo de metal,  $k$  tipo de papel,  $l$  tipo de vidrio,  $m$  tipo de plástico,  $n$  tipo de residuo médico, y/o tipo de residuo orgánico.

$$cw_i^{e-waste} = \beta_i^{e-waste} \cdot T^{e-waste}, \forall i \quad (32)$$

$$cw_j^{Metal} = \beta_j^{Metal} \cdot T^{Metal}, \forall j \quad (33)$$

$$cw_k^{Paper} = \beta_k^{Paper} \cdot T^{Paper}, \forall k \quad (34)$$

$$cw_l^{Glass} = \beta_l^{Glass} \cdot T^{Glass}, \forall l \quad (35)$$

$$cw_m^{Plastic} = \beta_m^{Plastic} \cdot T^{Plastic}, \forall m \quad (36)$$

$$cw_n^{Med-waste} = \beta_n^{Med-waste} \cdot T^{Med-waste}, \forall n \quad (37)$$

$$cw_o^{Organic} = \beta_o^{Organic} \cdot T^{Organic}, \forall o \quad (38)$$

$\beta_i^{e-waste}, \beta_j^{Metal}, \beta_k^{Paper}, \beta_l^{Glass}, \beta_m^{Plastic}, \beta_n^{Med-waste}, \beta_{o,s}^{Organic}$  son las fracciones utilizadas para separar cada tipo de residuo en sus respectivos residuos clasificados  $cw$  (ver **Tabla 3.10**).

**Tabla 3.10.** Fracciones de separación para los diferentes sub-residuos [69, 70, 75]

Parámetro	Descripción	Sub-residuo	Valor
$\beta_i^{e-waste}$	Representa la fracción de cada subtipo de residuo $i$ en los residuos electrónicos	Dispositivos grandes	0.25
		Dispositivos pequeños	0.75
$\beta_l^{Glass}$	Representa la fracción de cada subtipo de residuo $l$ en los residuos de vidrio	Transparente	0.58
		Marrón	0.21
		Verde	0.21
$\beta_n^{Med-waste}$	Representa la fracción de cada subtipo de residuo $n$ en los residuos médicos	General	0.27
		Infecioso	0.44
		Peligrosos	0.14
		Radioactivo	0.15
$\beta_j^{Metal}$	Representa la fracción de cada subtipo de residuo $j$ en los residuos metálicos	Metales preciosos	0.01
		Acero	0.4
		Hierro	0.4
		Aluminio	0.19
$\beta_o^{Organic}$	Representa la fracción de cada subtipo de residuo $o$ en los residuos orgánicos	Desperdicios de comida	0.694
		Residuos de madera	0.12
		Residuos verdes	0.186
$\beta_k^{Paper}$	Representa la fracción de cada subtipo de residuo $k$ en los residuos de papel	Alta calidad	0.294
		OCC	0.15
		ONP	0.556
$\beta_m^{Plastic}$	Representa la fracción de cada subtipo de residuo $m$ en los residuos plásticos	PS	0.102
		HDPE	0.125
		PET	0.057
		PE	0.716

Posteriormente, los residuos clasificados se envían a diferentes instalaciones para ser

procesados.

$$cw_i^{e-waste} = \sum_{z \in Z} f_{i,z}^{e-waste}, \forall i \quad (39)$$

$$cw_j^{Metal} = \sum_{y \in Y} f_{j,y}^{Metal}, \forall j \quad (40)$$

$$cw_k^{Paper} = \sum_{x \in X} f_{k,x}^{Paper}, \forall k \quad (41)$$

$$cw_l^{Glass} = \sum_{w \in W} f_{l,w}^{Glass}, \forall l \quad (42)$$

$$cw_m^{Plastic} = \sum_{v \in V} f_{m,v}^{Plastic}, \forall m \quad (43)$$

$$cw_n^{Med-waste} = \sum_{u \in U} f_{n,u}^{Med-waste}, \forall n \quad (44)$$

$$cw_o^{Organic} = \sum_{s \in S} f_{o,s}^{Organic}, \forall o \quad (45)$$

Donde  $f_{i,z}^{e-waste}$ ,  $f_{j,y}^{Metal}$ ,  $f_{k,x}^{Paper}$ ,  $f_{l,w}^{Glass}$ ,  $f_{m,v}^{Plastic}$ ,  $f_{n,u}^{Med-waste}$ ,  $f_{o,s}^{Organic}$  son los residuos clasificados que serán procesados por las diferentes tecnologías disponibles ( $z, y, x, w, v, u, s$ ).  $z$  representa las tecnologías disponibles para los desechos electrónicos,  $y$  las tecnologías disponibles para el procesamiento de metales,  $x$  las tecnologías disponibles para el procesamiento del papel,  $w$  las tecnologías disponibles para el papel,  $v$  las tecnologías disponibles para el procesamiento de plásticos,  $u$  las tecnologías disponibles para el procesamiento de los desechos médicos, y  $s$  las tecnologías disponibles para el procesamiento de desechos orgánicos.



### 3.2.1.2 Disyunciones para elegir qué tecnología de procesamiento usar

El uso de una tecnología en particular depende del objetivo perseguido. Los tipos de tecnología disponibles para metales son hidrometalurgia, pirometalurgia y refundición y están representados por el conjunto "z". Ya sea económico o social, entonces, la decisión de qué tipo de tecnología utilizar se basa en el valor de la variable booleana  $H_{j,y}^{Metal}$ , donde si su valor es *verdadero*, se utiliza esa tecnología de procesamiento, mientras que si es *falso* se descarta.

$$\left[ \begin{array}{l} H_{j,y}^{Metal} \\ f_{j,y}^{Metal} \geq \delta_{j,y}^{Metal, \min} \\ f_{j,y}^{Metal} \leq \delta_{j,y}^{Metal, \max} \\ Cost_{j,y}^{Metal} = A_{j,y}^{Metal} + B_{j,y}^{Metal} \cdot f_{j,y}^{Metal} \end{array} \right] \vee \left[ \begin{array}{l} \neg H_{j,y}^{Metal} \\ f_{j,y}^{Metal} = 0 \\ Cost_{j,y}^{Metal} = 0 \end{array} \right], \quad \forall j, \forall y \quad (46)$$

En la disyunción anterior,  $A_{j,y}^{Metal}$  y  $B_{j,y}^{Metal}$  son parámetros utilizados para considerar costos fijos y variables. La disyunción anterior se puede reformular de la siguiente manera:

$$f_{j,y}^{Metal} \geq \delta_{j,y}^{Metal, \min} \cdot h_{j,y}^{Metal}, \quad \forall j, \forall y \quad (47)$$

$$f_{j,y}^{Metal} \leq \delta_{j,y}^{Metal, \max} \cdot h_{j,y}^{Metal}, \quad \forall j, \forall y \quad (48)$$

$$Cost_{j,y}^{Metal} = kf \left( A_{j,y}^{Metal} \cdot h_{j,y}^{Metal} + B_{j,y}^{Metal} \cdot f_{j,y}^{Metal} \right), \quad \forall j, \forall y \quad (49)$$

Donde  $h_{j,y}^{Metal}$  es una variable binaria que cuando su valor es 0 se descarta la tecnología, mientras que cuando es 1 se decide utilizar esa tecnología. De manera análoga a lo anterior, es posible establecer las siguientes disyunciones para aquellos tratamientos que cuenten con más de una tecnología de procesamiento.

Para el papel, las tecnologías disponibles son la tecnología sin agua y el tratamiento del agua, representada por el conjunto y, la decisión de qué tipo de tecnología utilizar se basa en el valor de la variable booleana.  $H_{k,x}^{Paper}$ , donde si su valor es *verdadero*, se utiliza esa tecnología de procesamiento, mientras que si es *falso* se descarta.

$$\left[ \begin{array}{c} H_{k,x}^{Paper} \\ f_{k,x}^{Paper} \geq \delta_{k,x}^{Paper,\min} \\ f_{k,x}^{Paper} \leq \delta_{k,x}^{Paper,\max} \\ Cost_{k,x}^{Paper} = A_{k,x}^{Paper} + B_{k,x}^{Paper} \cdot f_{k,x}^{Paper} \end{array} \right] \vee \left[ \begin{array}{c} \neg H_{k,x}^{Paper} \\ f_{k,x}^{Paper} = 0 \\ Cost_{k,x}^{Paper} = 0 \end{array} \right], \quad \forall k, \forall x \quad (50)$$

De forma análoga,  $A_{k,x}^{Paper}$  y  $B_{k,x}^{Paper}$  son parámetros que se utilizan para considerar los costos fijos y los costos variables. La disyunción anterior se puede reformular de la siguiente manera:

$$f_{k,x}^{Paper} \geq \delta_{k,x}^{Paper,\min} \cdot h_{k,x}^{Paper}, \quad \forall k, \forall x \quad (51)$$

$$f_{k,x}^{Paper} \leq \delta_{k,x}^{Paper,\max} \cdot h_{k,x}^{Paper}, \quad \forall k, \forall x \quad (52)$$

$$Cost_{k,x}^{Paper} = kf \left( A_{k,x}^{Paper} \cdot h_{k,x}^{Paper} + B_{k,x}^{Paper} \cdot f_{k,x}^{Paper} \right), \quad \forall k, \forall x \quad (53)$$

Donde  $h_{k,x}^{Paper}$  es una variable binaria, que cuando su valor es 0 se descarta la tecnología, mientras que cuando es 1 se decide utilizar esa tecnología.

Para el plástico, las tecnologías disponibles son la tecnología de nanotubos, reciclaje químico y reciclaje mecánico, representada por el conjunto  $x$ , la decisión de qué tipo de tecnología utilizar se basa en el valor de la variable booleana  $H_{m,v}^{Plastic}$ , donde si su valor es *verdadero*, se utiliza esa tecnología de procesamiento, mientras que si es *falso* se descarta.

$$\left[ \begin{array}{c} H_{m,v}^{Plastic} \\ f_{m,v}^{Plastic} \geq \delta_{m,v}^{Plastic,\min} \\ f_{m,v}^{Plastic} \leq \delta_{m,v}^{Plastic,\max} \\ Cost_{m,v}^{Plastic} = A_{m,v}^{Plastic} + B_{m,v}^{Plastic} \cdot f_{m,v}^{Plastic} \end{array} \right] \vee \left[ \begin{array}{c} \neg H_{m,v}^{Plastic} \\ f_{m,v}^{Plastic} = 0 \\ Cost_{m,v}^{Plastic} = 0 \end{array} \right], \quad \forall m, \forall v \quad (54)$$

De forma análoga,  $A_{m,v}^{Plastic}$  y  $B_{m,v}^{Plastic}$  son parámetros que se utilizan para considerar los costos fijos y los costos variables. La disyunción anterior se puede reformular de la siguiente manera:

$$f_{m,v}^{Plastic} \geq \delta_{m,v}^{Plastic,\min} \cdot h_{m,v}^{Plastic}, \quad \forall m, \forall v \quad (55)$$

$$f_{m,v}^{Plastic} \leq \delta_{m,v}^{Plastic,max} \cdot h_{m,v}^{Plastic}, \quad \forall m, \forall v \quad (56)$$

$$Cost_{m,x}^{Plastic} = kf \left( A_{m,v}^{Plastic} \cdot h_{m,v}^{Plastic} + B_{m,v}^{Plastic} \cdot f_{m,v}^{Plastic} \right), \quad \forall m, \forall v \quad (57)$$

Donde  $h_{m,v}^{Plastic}$  es una variable binaria, que cuando su valor es 0 se descarta la tecnología, mientras que cuando es 1 se decide utilizar esa tecnología.

Para los residuos médicos, las tecnologías disponibles son el tratamiento térmico alternativo, el tratamiento químico y el tratamiento de incineración, representado por el conjunto  $w$ , la decisión de qué tipo de tecnología utilizar se basa en el valor de la variable booleana  $H_{n,u}^{Med-waste}$ , donde si su valor es *verdadero*, se utiliza esa tecnología de procesamiento, mientras que si es *falso* se descarta.

$$\left[ \begin{array}{l} H_{n,u}^{Med-waste} \\ f_{n,u}^{Med-waste} \geq \delta_{n,u}^{Med-waste,min} \\ f_{n,u}^{Med-waste} \leq \delta_{n,u}^{Med-waste,max} \\ Cost_{n,u}^{Med-waste} = A_{n,u}^{Med-waste} + B_{n,u}^{Med-waste} \cdot f_{n,u}^{Med-waste} \end{array} \right] \vee \left[ \begin{array}{l} \neg H_{n,u}^{Med-waste} \\ f_{n,u}^{Med-waste} = 0 \\ Cost_{n,u}^{Med-waste} = 0 \end{array} \right], \quad \forall n, \forall u \quad (58)$$

De forma análoga,  $A_{n,u}^{Med-waste}$  y  $B_{n,u}^{Med-waste}$  son parámetros que se utilizan para considerar los costos fijos y los costos variables. La disyunción anterior se puede reformular de la siguiente manera:

$$f_{n,u}^{Med-waste} \geq \delta_{n,u}^{Med-waste,min} \cdot h_{n,u}^{Med-waste}, \quad \forall n, \forall u \quad (59)$$

$$f_{n,u}^{Med-waste} \leq \delta_{n,u}^{Med-waste,max} \cdot h_{n,u}^{Med-waste}, \quad \forall n, \forall u \quad (60)$$

$$Cost_{n,u}^{Med-waste} = kf \left( A_{n,u}^{Med-waste} \cdot h_{n,u}^{Med-waste} + B_{n,u}^{Med-waste} \cdot f_{n,u}^{Med-waste} \right), \quad \forall n, \forall u \quad (61)$$

Donde  $h_{n,u}^{Med-waste}$  es una variable binaria, que cuando su valor es 0 se descarta la tecnología, mientras que cuando es 1 se decide utilizar esa tecnología.

Para los residuos orgánicos, las tecnologías disponibles son incineración, pirólisis, gasificación y compostaje, representadas por el conjunto  $v$ , la decisión de qué tipo de tecnología utilizar se basa en el valor de la variable booleana  $H_{o,s}^{Organic}$ , donde si su valor es

*verdadero*, se utiliza esa tecnología de procesamiento, mientras que si es *falso* se descarta.

$$\left[ \begin{array}{l} H_{o,s}^{Organic} \\ f_{o,s}^{Organic} \geq \delta_{o,s}^{Organic,min} \\ f_{o,s}^{Organic} \leq \delta_{o,s}^{Organic,max} \\ Cost_{o,s}^{Organic} = A_{o,s}^{Organic} + B_{o,s}^{Organic} \cdot f_{o,s}^{Organic} \end{array} \right] \vee \left[ \begin{array}{l} \neg H_{o,s}^{Organic} \\ f_{o,s}^{Organic} = 0 \\ Cost_{o,s}^{Organic} = 0 \end{array} \right], \quad \forall o, \forall s \quad (62)$$

De forma análoga,  $A_{o,s}^{Organic}$  y  $B_{o,s}^{Organic}$  son parámetros que se utilizan para considerar los costos fijos y los costos variables. La disyunción anterior se puede reformular de la siguiente manera:

$$f_{o,s}^{Organic} \geq \delta_{o,s}^{Organic,min} \cdot h_{o,s}^{Organic}, \quad \forall o, \forall s \quad (63)$$

$$f_{o,s}^{Organic} \leq \delta_{o,s}^{Organic,max} \cdot h_{o,s}^{Organic}, \quad \forall o, \forall s \quad (64)$$

$$Cost_{o,s}^{Organic} = kf \left( A_{o,s}^{Organic} \cdot h_{o,s}^{Organic} + B_{o,s}^{Organic} \cdot f_{o,s}^{Organic} \right), \quad \forall o, \forall s \quad (65)$$

Donde  $h_{o,s}^{Organic}$  es una variable binaria, que cuando su valor es 0 se descarta la tecnología, mientras que cuando es 1 se decide utilizar esa tecnología.

Adicionalmente, para residuos sólidos como los electrónicos y el vidrio, si bien cuentan con una sola tecnología de procesamiento (en la superestructura), es necesario incluir las ecuaciones, en caso de que se decida implementar alguna tecnología adicional:

$$\left[ \begin{array}{l} H_{i,z}^{e-waste} \\ f_{i,z}^{e-waste} \geq \delta_{i,z}^{e-waste,min} \\ f_{i,z}^{e-waste} \leq \delta_{i,z}^{e-waste,max} \\ Cost_{i,z}^{e-waste} = A_{i,z}^{e-waste} + B_{i,z}^{e-waste} \cdot f_{i,z}^{e-waste} \end{array} \right] \vee \left[ \begin{array}{l} \neg H_{i,z}^{e-waste} \\ f_{i,z}^{e-waste} = 0 \\ Cost_{i,z}^{e-waste} = 0 \end{array} \right], \quad \forall i, \forall z \quad (66)$$

$$f_{i,z}^{e-waste} \geq \delta_{i,z}^{e-waste,min} \cdot h_{i,z}^{e-waste}, \quad \forall i, \forall z \quad (67)$$

$$f_{i,z}^{e-waste} \leq \delta_{i,z}^{e-waste,max} \cdot h_{i,z}^{e-waste}, \quad \forall i, \forall z \quad (68)$$

$$Cost_{i,z}^{e-waste} = kf \left( A_{i,z}^{e-waste} \cdot h_{i,z}^{e-waste} + B_{i,z}^{e-waste} \cdot f_{i,z}^{e-waste} \right), \quad \forall i, \forall z \quad (69)$$

$$\left[ \begin{array}{c} H_{l,w}^{Glass} \\ f_{l,w}^{Glass} \geq \delta_{l,w}^{Glass,\min} \\ f_{l,w}^{Glass} \leq \delta_{l,w}^{Glass,\max} \\ Cost_{l,w}^{Glass} = A_{l,w}^{Glass} + B_{l,w}^{Glass} \cdot f_{l,w}^{Glass} \end{array} \right] \vee \left[ \begin{array}{c} \neg H_{l,w}^{Glass} \\ f_{l,w}^{Glass} = 0 \\ Cost_{l,w}^{Glass} = 0 \end{array} \right], \quad \forall l, \forall w \quad (70)$$

$$f_{l,w}^{Glass} \geq \delta_{l,w}^{Glass,\min} \cdot h_{l,w}^{Glass}, \quad \forall l, \forall w \quad (71)$$

$$f_{l,w}^{Glass} \leq \delta_{l,w}^{Glass,\max} \cdot h_{l,w}^{Glass}, \quad \forall l, \forall w \quad (72)$$

$$Cost_{l,w}^{Glass} = kf \left( A_{l,w}^{Glass} \cdot \xi_{l,w}^{Glass} + B_{l,w}^{Glass} \cdot f_{l,w}^{Glass} \right), \quad \forall l, \forall w \quad (73)$$

Donde  $A_{l,w}^{Glass}$  y  $A_{i,z}^{e-waste}$  son parámetros que se utilizan para considerar los costos fijos,  $B_{l,w}^{Glass}$  y  $B_{i,z}^{e-waste}$  son parámetros para considerar los costos variables. Los diferentes valores para los parámetros de costos fijos y variables se muestran en la **Tabla 3.11**. Los valores  $\delta$  para todos los casos representan los límites de búsqueda para las cantidades de material a procesar, estos valores se establecen con un límite inferior cercano a 0 y un límite superior igual a la cantidad total de residuos generados por año.

**Tabla 3.11.** Costos fijos y variables de tecnologías de procesamiento.

Parámetro	Descripción	Valor	Unidades	Referencias
$A_{i, Separation\ process}^{e-waste}, \forall i$	Costo fijo por emplear procesos de separación para todo Sub-residuo electrónico	3,137,030	\$US	[76]
$A_{l, remelting}^{Glass}, \forall l$	Costo fijo por emplear refundición para todo de Sub-residuo de vidrio	5,000,000	\$US	[77]
$A_{n, Alt. Thermal\ treatment}^{Med-waste}, \forall n$	Costo fijo por emplear tratamiento térmico para todo Sub-residuo médico	2,000,000	\$US	[78]
$A_{n, Incineration}^{Med-waste}, \forall n$	Costo fijo por emplear incineración para todo Sub-residuo médico	4,000,000	\$US	[78]
$A_{j, Hydrometallurgy}^{Metal}, \forall j$	Costo fijo por emplear hidrometalurgia para todo Sub-residuo metálico	5,384,000	\$US	[79, 80, 81]
$A_{j, Pyrometallurgy}^{Metal}, \forall j$	Costo fijo por emplear pirometalurgia para todo Sub-residuo metálico	6,044,000	\$US	[79, 80, 81]
$A_{j, Remelting}^{Metal}, \forall j$	Costo fijo por emplear refundición para todo Sub-residuo metálico	4,440,000	\$US	[82]
$A_{o, compost}^{Organic}, \forall o$	Costo fijo por generar compostas para todo Sub-residuo orgánico	9,573,000	\$US	[76]
$A_{o, Gasification}^{Organic}, \forall o$	Costo fijo por emplear gasificación para todo Sub-residuo orgánico	6,412,410	\$US	[83]
$A_{o, Incineration}^{Organic}, \forall o$	Costo fijo por emplear incineración para todo Sub-residuo orgánico	4,000,000	\$US	[78]

$A_{o,Pyrolysis}^{Organic}, \forall o$	Costo fijo por emplear pirolisis para todo Sub-residuo orgánico	2,000,000	\$US	[84]
$A_{High\ Grade,Waterless\ Tech}^{Paper}$	Costo fijo por emplear tecnología libre de agua para todo Sub-residuo de papel	8,700,000	\$US	[85]
$A_{k,Water\ Treatment}^{Paper}, \forall k$	Costo fijo por emplear tecnología basada en agua para todo Sub-residuo de papel	1,880,000	\$US	[86]
$A_{m,Chemical\ recycling}^{Plastic}, \forall m$	Costo fijo por emplear reciclado químico para todo Sub-residuo plástico	2,090,000	\$US	[87]
$A_{m,Mechanical\ recycling}^{Plastic}, \forall m$	Costo fijo por emplear reciclado mecánico para todo Sub-residuo plástico	1,590,000	\$US	[88]
$A_{m,Tech\ nanotubes}^{Plastic}, \forall m$	Costo fijo por emplear tecnología de nanotubos para todo Sub-residuo plástico	200,000,000	\$US	[89]
$B_{i,Separation\ process}^{e-waste}, \forall i$	Costo variable por emplear procesos de separación para todo Sub-residuo electrónico	2.82	\$US/Ton	[76]
$B_{Clear,remelting}^{Glass}$	Costo variable por emplear refundición para residuos de vidrio transparente	70	\$US/Ton	[84]
$B_{l,remelting}^{Glass} \rightarrow l = Brown, Green$	Costo variable por emplear refundición para residuos de vidrio marrón y verde	90	\$US/Year	[84]
$B_{n,Alt.Thermal\ treatment}^{Med-waste}, \forall n$	Costo variable por emplear tratamientos térmicos para sub-residuos médicos	400	\$US/Ton	[78]

$B_{n,Chemical\ treatment}^{Med-waste}, \forall n$	Costo variable por emplear tratamientos químicos para sub-residuos médicos	200	\$US/Ton	[78]
$B_{n,Incineration}^{Med-waste}, \forall n$	Costo variable por emplear incineración para sub-residuos médicos	380	\$US/Ton	[78]
$B_{j,Hydrometallurgy}^{Metal}, \forall j$	Costo variable por emplear hidrometalurgia para sub-residuos metálicos	112	\$US/Ton	[79,80,81]
$B_{j,Pyrometallurgy}^{Metal}, \forall j$	Costo variable por emplear pirometalurgia para sub-residuos metálicos	217	\$US/Ton	[79,80,81]
$B_{o,compost}^{Organic}, \forall o$	Costo variable por generar compostas para sub-residuos orgánicos	20.15	\$US/Ton	[76]
$B_{o,Gasification}^{Organic}, \forall o$	Costo variable por emplear gasificación para sub-residuos orgánicos	36	\$US/Ton	[89]
$B_{o,Incineration}^{Organic}, \forall o$	Costo variable por emplear incineración para sub-residuos orgánicos	400	\$US/Ton	[78]
$B_{o,Pyrolysis}^{Organic}, \forall o$	Costo variable por emplear pirolisis para sub-residuos orgánicos	354	\$US/Ton	[91]
$B_{High\ Grade,Waterless\ Tech}^{Paper}$	Costo variable por emplear incineración para sub-residuos orgánicos	1,800	\$US/Ton	[45]
$B_{High\ Grade,Water\ Treatment}^{Paper}$	Costo variable por emplear tecnologías basadas en agua para papel de alta calidad	56	\$US/Ton	[92, 93]
$B_{OCC,Water\ Treatment}^{Paper}$	Costo variable por emplear tecnologías	31	\$US/Ton	[92, 93]



	basadas en agua para papel OCC			
$B_{ONP, WaterTreatment}^{Paper}$	Costo variable por emplear tecnologías basadas en agua para papel ONP	32	\$US/Ton	[92, 93]
$B_{m, Chemical\ recycling}^{Plastic}, \forall m$	Costo variable por emplear reciclaje químico para sub-residuos plásticos	106.6	\$US/Ton	[84]
$B_{m, Mechanical\ recycling}^{Plastic}, \forall m$	Costo variable por emplear reciclaje mecánico para sub-residuos plásticos	144	\$US/Ton	[94]
$B_{m, Technanotubes}^{Plastic}, \forall m$	Costo variable por emplear tecnologías de nanotubos para sub-residuos plásticos	55,000	\$US/Ton	[95]
$kf$	Factor de anualidad	0.3	Year <sup>-1</sup>	[96]

Finalmente, todos los residuos inorgánicos procesados se convierten en productos que se pueden vender a la ciudad de origen, independientemente del tipo de tecnología utilizada para su procesamiento, entonces:

$$P_{i,z}^{e-waste} = \gamma_{i,z}^{e-waste} \cdot f_{i,z}^{e-waste}, \forall i, \forall z \quad (74)$$

$$P_{j,y}^{Metal} = \gamma_{j,y}^{Metal} \cdot f_{j,y}^{Metal}, \forall j, \forall y \quad (75)$$

$$P_{k,x}^{Paper} = \gamma_{k,x}^{Paper} \cdot f_{k,x}^{Paper}, \forall k, \forall x \quad (76)$$

$$P_{l,w}^{Glass} = \gamma_{l,w}^{Glass} \cdot f_{l,w}^{Glass}, \forall l, \forall w \quad (77)$$

$$P_{m,v}^{Plastic} = \gamma_{m,v}^{Plastic} \cdot f_{m,v}^{Plastic}, \forall m, \forall v \quad (78)$$

Donde  $P_{i,z}^{e-waste}$ ,  $P_{j,y}^{Metal}$ ,  $P_{k,x}^{Paper}$ ,  $P_{l,w}^{Glass}$ ,  $P_{m,v}^{Plastic}$  son los productos que se obtienen a partir de residuos sólidos de residuos electrónicos, metal, papel, vidrio y plástico, respectivamente.

Para los residuos médicos, el material de postratamiento restante se envía a un vertedero especial donde puede ser depositado de forma segura.

$$r_{n,u}^{Med-waste} = \gamma_{n,u}^{Med-waste} \cdot f_{n,u}^{Med-waste}, \forall n, \forall u \quad (79)$$

Donde  $r_{n,u}^{Med-waste}$  es el reciclaje de materia orgánica por tratamiento en agricultura.

$\gamma_{i,z}^{e-waste}$ ,  $\gamma_{j,y}^{Metal}$ ,  $\gamma_{k,x}^{Paper}$ ,  $\gamma_{l,w}^{Glass}$ ,  $\gamma_{m,v}^{Plastic}$ ,  $\gamma_{n,u}^{Med-waste}$ ,  $\gamma_{o,s}^{Organic}$  son las fracciones que según su respectiva tecnología (z, y, x, w, v, u, s) son capaces de convertir en productos (ver **Tabla 3.11**).

**Tabla 3.12.** Factores de eficiencia para las tecnologías de procesamiento.

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN	TECNOLOGÍA	PRODUCTO	FACTOR DE PRODUCCIÓN TONELADA PRODUCTO/ TONELADA RESIDUO	REFERENCIAS
$\gamma_{i,z}^{e-waste}, \forall i$	Factor de eficiencia para la conversión de tecnología $z$ de tipo $i$ de desechos electrónicos a productos	Procesos de separación	Metales	0.75	[97]
$\gamma_{l,w}^{Glass}, \forall l$	Factor de eficiencia para conversión de tecnología $w$ de tipo $l$ de vidrio a productos	Refundición	Nuevo vidrio	1	[13]
$\gamma_{n,u}^{Med-waste}, \forall n$	Factor de eficiencia para la conversión de tecnología $u$ de tipo $n$ de desechos médicos a productos	Tratamiento térmico alternativo	Energía	0.685 <sup>A</sup>	[97]
		Tratamiento químico	Energía	0.571 <sup>A</sup>	[97]
		Tratamiento de incineración	Energía	0.685 <sup>A</sup>	[97]
$\gamma_{j,y}^{Metal}, \forall j$	Factor de eficiencia para conversión de tecnología $y$ de tipo $j$ de metal a productos	Hidrometalurgia	Metales	0.990	[98]
		Pirometalurgia	Metales	0.990	[99]
		Refundición	Metales	1	[100]
$\gamma_{o,s}^{Organic}, \forall o$	Factor de eficiencia para conversión de tecnología $s$ de tipo $o$ de orgánico a productos	Incineración	Energía	0.544 <sup>A</sup>	[98]
		Pirolisis	Energía	0.685 <sup>A</sup>	[98]
		Gasificación	Energía	0.685 <sup>A</sup>	[98]
$\gamma_{k,x}^{Paper}, \forall k$	Factor de eficiencia para conversión de tecnología $x$ de tipo $k$ de papel a productos	Composta	Fertilizante orgánico	1	[101]
		Tratamiento basado en agua	Nuevo papel	0.84	[102]
$\gamma_{m,v}^{Plastic}, \forall m$		Producción de nanotubos	Nanotubos	0.320	[103]

Factor de eficiencia para conversión de tecnología $v$ de tipo $m$ de plástico a productos	Reciclaje químico	Aceite pirolítico	0.432	[104]
	Reciclaje mecánico	Pellet	0.672	[104]

<sup>A</sup> Este factor tiene unidades de MWH Energía / Tonelada de Residuos.

### 3.2.1.3 Costos y ventas asociados a la gestión de RSU

El tratamiento de residuos sólidos requiere diferentes niveles de inversión según el tipo de tecnología a implementar o la capacidad de procesamiento deseada, además del gasto asociado al transporte de la materia prima. Los costos totales se calculan de la siguiente manera:

$$TC = \text{Transport cost} + \text{Treatment cost} + \text{Taxes} \quad (80)$$

$$\text{Transport cost} = RMTC + PTC \quad (81)$$

$$\begin{aligned}
RMTC = & TCPTR \left( T^{e-waste} + T^{Metal} + T^{Paper} + T^{Glass} + T^{Plastic} + T^{Landfill} + T^{Med-waste} + T^{Organic} \right) \\
& + SC^{e-waste} \cdot T^{e-waste} + SC^{Metal} \cdot T^{Metal} + SC^{Paper} \cdot T^{Paper} + SC^{Glass} \cdot T^{Glass} + SC^{Plastic} \cdot T^{Plastic} \\
& + SC^{Med-waste} \cdot T^{Med-waste} + SC^{Organic} \cdot T^{Organic}
\end{aligned} \quad (82)$$

$$PTC = TCPTP \left( \sum_{i \in I} \sum_{z \in Z} P_{i,z}^{e-waste} + \sum_{j \in J} \sum_{y \in Y} P_{j,y}^{Metal} + \sum_{k \in K} \sum_{x \in X} P_{k,x}^{Paper} + \sum_{l \in L} \sum_{w \in W} P_{l,w}^{Glass} + \sum_{m \in M} \sum_{v \in V} P_{m,v}^{Plastic} + \sum_{o \in O} r_{o,Compost}^{Organic} \right) \quad (83)$$

$$\begin{aligned}
\text{Treatment cost} = & \sum_{i \in I} \sum_{z \in Z} cost_{i,z}^{e-waste} + \sum_{j \in J} \sum_{y \in Y} cost_{j,y}^{Metal} + \sum_{k \in K} \sum_{x \in X} cost_{k,x}^{Paper} + \sum_{l \in L} \sum_{w \in W} cost_{l,w}^{Glass} \\
& + \sum_{m \in M} \sum_{v \in V} cost_{m,v}^{Plastic} + \sum_{n \in N} \sum_{u \in U} cost_{n,u}^{Med-waste} + \sum_{o \in O} \sum_{s \in S} cost_{o,s}^{Organic}
\end{aligned} \quad (84)$$

Donde  $RMTC$  es el costo de transporte de materia prima (costo de transporte de residuos sólidos), que también incluye el costo de separación ( $SC$ ),  $PTC$  es el costo de transporte de los productos,  $TCPTR$  es el costo total por tonelada de residuos transportados y  $TCPTP$  es el costo total por tonelada de producto transportado.

Para el cálculo de los impuestos, en primer lugar, se consideran dos nuevas variables para separar los residuos que serán asignados con una penalización menor y con una mayor penalización.  $T^{\text{landL}}$  se refiere a los residuos que serán asignados con una penalización menor y  $T^{\text{landH}}$  a los residuos que serán gravados con una mayor penalización.

$$T^{\text{Landfill}} = T^{\text{landH}} + T^{\text{landL}} \quad (85)$$

Entonces, se propone la siguiente disyunción.

$$\left[ \begin{array}{l} H^{\text{Landfill}} \\ T^{\text{landL}} < T^{\text{II}} \end{array} \right] \vee \left[ \begin{array}{l} \neg H^{\text{Landfill}} \\ T^{\text{landH}} \geq T^{\text{II}} \\ T^{\text{landH}} \leq T^{\text{III}} \end{array} \right] \quad (86)$$

Donde  $T^{\text{II}}$  es el límite superior (en este caso, 80.000) para los residuos generados para el impuesto más bajo, pero también es el límite inferior para el impuesto más alto.  $T^{\text{III}}$  es el límite superior (en este caso, 250 000) para el impuesto más alto. La disyunción anterior se puede reformular de la siguiente manera:

$$T^{\text{landL}} < T^{\text{II}} \cdot H^{\text{Landfill}} \quad (87)$$

$$T^{\text{landH}} \geq T^{\text{II}} (1 - H^{\text{Landfill}}) \quad (88)$$

$$T^{\text{landH}} \leq T^{\text{III}} (1 - H^{\text{Landfill}}) \quad (89)$$

Finalmente, los impuestos se pueden obtener con las siguientes relaciones:

$$\begin{aligned} \text{Taxes}^{\text{L}} &= TPT^{\text{L}} \cdot T^{\text{landL}} \\ (68) \end{aligned}$$

$$\text{Taxes}^{\text{H}} = TPT^{\text{H}} \cdot T^{\text{landH}} \quad (90)$$

Donde  $TPT^{\text{L}}$  es el impuesto unitario más bajo y  $TPT^{\text{H}}$  es el impuesto unitario más alto.

$$\text{Taxes} = \text{Taxes}^{\text{L}} + \text{Taxes}^{\text{H}} \quad (91)$$

Los ingresos variarán según el tipo de material procesado y la cantidad. Además de los ingresos asociados a la producción de energía. Por lo tanto, los ingresos se pueden calcular de la siguiente manera:

$$Revenue = MS + AS + ES \quad (92)$$

$$MS = EMPT \sum_{i \in I} \sum_{z \in Z} p_{i,z}^{e-waste} + MPT \sum_{j \in J} \sum_{y \in Y} p_{j,y}^{Metal} + PPT \sum_{k \in K} \sum_{x \in X} p_{k,x}^{Paper} + GPT \sum_{l \in L} \sum_{w \in W} p_{l,w}^{Glass} +$$

$$PPS \cdot \sum_{v \in V} p_{Mechanical\ recycling,v}^{Plastic} + NPS \cdot \sum_{v \in V} p_{Tech\ for\ nanotubes,v}^{Plastic} + OPS \cdot \sum_{v \in V} p_{Chemical\ recycling,v}^{Plastic} \quad (93)$$

$$AS = OMPT \sum_{o \in O} p_{o,compost}^{Organic} \quad (94)$$

$$ES = SPMW \left( \sum_{n \in N} \sum_{u \in U} r_{n,u}^{Med-waste} + \sum_{o \in O} r_{o,Incineration}^{Organic} + \sum_{o \in O} r_{o,Pyrolysis}^{Organic} + \sum_{o \in O} r_{o,Gasification}^{Organic} \right) \quad (95)$$

Donde  $MS$  corresponde a las ventas asociadas con los materiales procesados,  $AS$  representa las ventas asociadas con la agricultura y  $ES$  define las ventas asociadas con la producción de energía.  $EMPT$  son las ventas por tonelada asociadas con material electrónico,  $MPT$  son las ventas por tonelada asociadas con el metal,  $PPT$  son las ventas por tonelada asociadas con el papel,  $GPT$  son las ventas por tonelada asociadas con el vidrio,  $PPS$  corresponde a las ventas por tonelada asociadas con producción de pellets,  $NPS$  representa las ventas por tonelada asociadas con la producción de nanotubos y  $OPS$  define las ventas por tonelada asociadas con la producción de aceite de pirólisis.  $OMPT$  corresponde a las ventas por tonelada asociadas a materia orgánica. Para la energía,  $SPMW$  es el precio de venta por megavatio-hora producido.

Finalmente, el beneficio total se puede calcular como:

$$Total\ profit = Revenue - TC \quad (96)$$

En la **Tabla 3.12** se muestran los diferentes parámetros asociados a costos y ventas.

**Tabla 3.13.** Parámetros asignados para los costos de separación y procesamiento de residuos y productos.

PARAMETRO	VALOR	UNIDADES	DESCRIPCIÓN	REFERENCIAS
EMPT	1300	\$US/Ton	Ventas por tonelada asociadas a material electrónico	[100]
GPT	29.94	\$US/Ton	Ventas por tonelada asociadas al vidrio	[13]
MPT	1300	\$US/Ton	Ventas por tonelada asociadas al metal	[100]
NPS	150,000	\$US/Ton	Ventas por tonelada asociadas a la producción de nanotubos	[13]
OMPT	100	\$US/Ton	Ventas por tonelada asociada a materia orgánica	[105]
OPS	180	\$US/Ton	Ventas por tonelada asociadas a la producción de aceite de pirólisis	[13]
PPS	211	\$US/Ton	Ventas por tonelada asociadas a la producción de pellets	[13]
PPT	210	\$US/Ton	Ventas por tonelada asociadas al papel	[13]
SC	235	\$US/Ton	Costo estimado de separación	[13]
SPMW	18.94	\$US/MWh	Precio de venta por megavatio-hora producido	[98]
TCPTR	0.686	\$US/Ton	Costo total por tonelada de residuos transportados	[13]
TPT	2	\$US/Ton	Impuestos por tonelada asociados al depósito de residuos en el vertedero	[106]
TW	250,000	Ton/Year	Residuos totales	[69; 73, 68]

#### 3.2.1.4 Funciones objetivo para la gestión de RSU

Para la superestructura mostrada anteriormente, es posible proponer diferentes objetivos según el caso, favorecer el beneficio económico, reducir el impacto en el medio ambiente o favorecer el desarrollo social son algunos ejemplos. Para minimizar el impacto ambiental, se debe reducir la cantidad de residuos sin tratar (ver Ec. (31)).

Debido a que las capacidades de procesamiento de residuos no son ilimitadas, una cierta cantidad de residuos sólidos debe enviarse a un vertedero. Reducir la cantidad de

residuos que se envían beneficiaría al medio ambiente, además de reducir la cantidad de impuestos.

$$\min T^{Landfill} \quad (97)$$

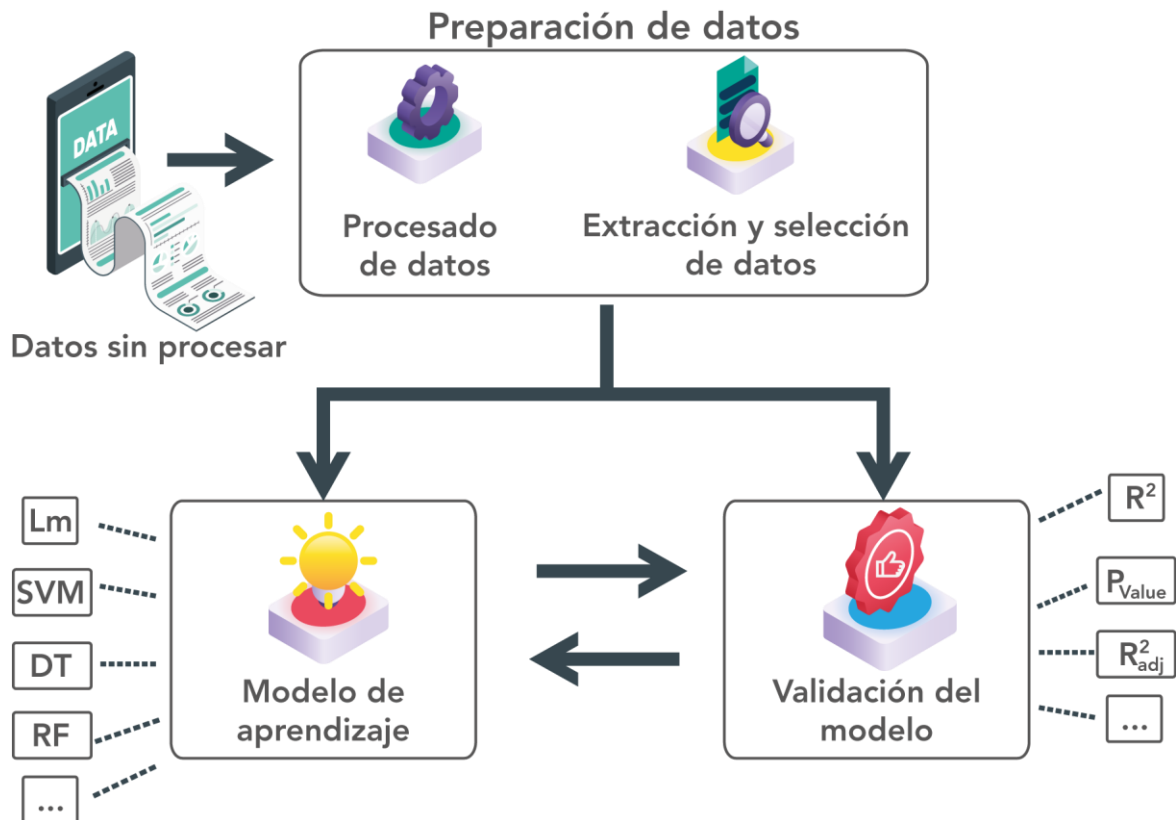
Sí lo que se requiere es maximizar el beneficio económico, se necesitará maximizar el beneficio total de la siguiente manera (ver Ec. (96)):

$$\max Total\ profit \quad (98)$$

### **3.2.1.5 Máquina de aprendizaje para futuras predicciones de generación de residuos**

¿Qué ocurre en los años posteriores a la instalación del parque industrial? Para responder a esta pregunta, es necesario implementar herramientas de predicción, que permitan comparar escenarios hipotéticos con la implementación de parques industriales con distintas capacidades de producción, en la **Figura 3.5** se muestra los pasos para la creación de la máquina de aprendizaje empleada para el caso planteado, se propone predecir las cantidades de residuos generadas a partir de datos como la población mayor a 45 años, el ingreso familiar promedio y el desempleo, esta estrategia fue propuesta por Kannangara et al. [107], obteniendo buenos resultados para una región de Canadá. El conjunto de datos ya procesados para el entrenamiento y validación de esta máquina de aprendizaje se encuentran en la **Tabla 3.14**.





**Figura 3.5.** Esquema del flujo de trabajo de las máquinas de aprendizaje.

La implementación de máquinas de aprendizaje permite una proyección a futuro de los parámetros existentes en el modelo matemático planteado, por lo que se requiere del uso en conjunto del software donde se decida codificar el modelo matemático y donde se codifique la máquina de aprendizaje (ver **Figura 3.6**).

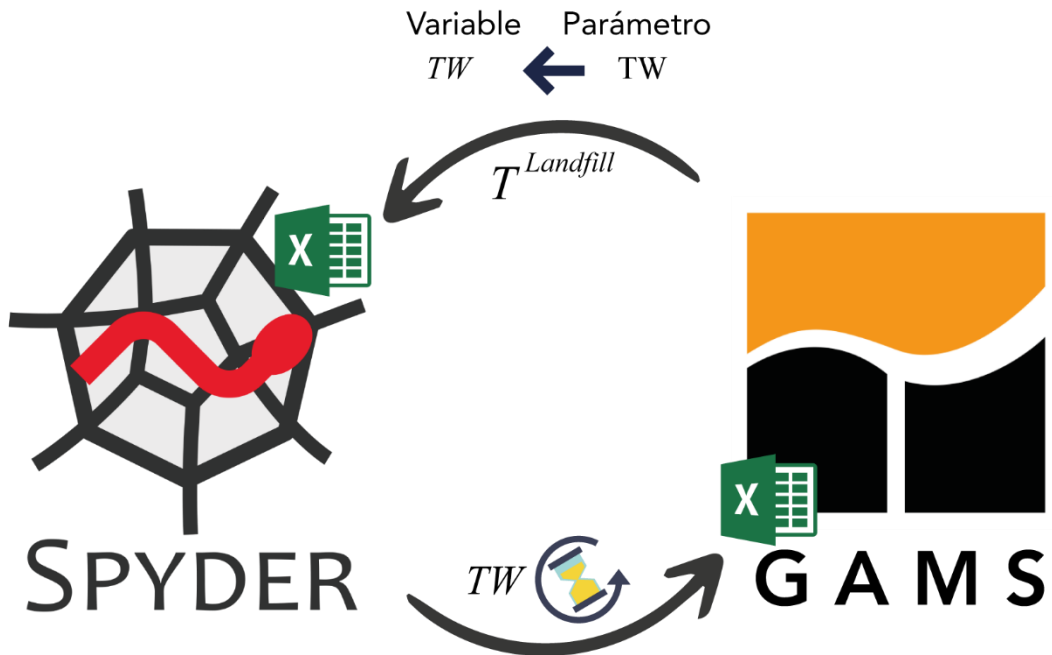


Figura 3.6. Implementación en conjunto de Spyder-GAMS.

**Tabla 3.14.** Conjunto de datos de Entrenamiento y Prueba para la máquina de aprendizaje [108,109,110].

<b>Año</b>	<b>Población mayor a 45</b>	<b>Ingreso familiar promedio (\$)</b>	<b>Desempleo (%)</b>	<b>RSU recolectados (Ton)</b>
2000	2,633,696.00	40,744.00	4.5	3,149,502.92
2001	2,663,883.00	42,114.00	4.9	3,236,595.92
2002	2,694,070.00	41,966.00	6.2	3,256,829.72
2003	2,724,256.00	42,788.00	6.4	3,284,522.62
2004	2,754,443.00	44,649.00	5.8	3,455,575.82
2005	2,784,630.00	47,176.00	5	3,451,173.22
2006	2,821,953.00	48,222.00	4.5	3,381,763.82
2007	2,859,276.00	48,944.00	4.4	3,288,252.72
2008	2,896,599.00	50,461.00	5.4	3,215,868.52
2009	2,933,922.00	50,216.00	8.4	3,156,475.03
2010	2,971,245.00	49,781.00	8.7	3,077,241.73
2011	2,998,438.00	50,636.00	8.3	3,207,834.73
2012	3,025,631.00	47,680.00	8.6	3,100,688.86
2013	3,052,823.00	53,843.00	7.8	3,065,157.91
2014	3,080,016.00	54,310.00	6.3	3,066,627.21
2015	3,107,209.00	58,005.00	5.2	3,063,037.31
2016	3,127,655.00	61,437.00	4.9	3,098,185.50
2017	3,148,101.00	62,447.00	4.6	3,114,254.70
2018	3,168,548.00	67,274.00	4.1	3,166,802.00
2019	3,188,994.00	71,855.00	3.8	3,155,430.10
2020	3,209,440.00	68,304.00	9.9	3,336,524.20
2021	3,009,440.00	79,900.00	6.9	3,302,253.40

### 3.2.1.6 Ubicación del Proyecto para la gestión de residuos

El caso de estudio seleccionado para la aplicación del modelo matemático propuesto es la ciudad de Nueva York, donde se propone la construcción del parque industrial en la región de Staten Island. La ciudad de Nueva York es una de las ciudades que más desechos genera en los Estados Unidos [73], además de ser una de las ciudades que más se ha visto afectada por el COVID-19 y la generación de desechos médicos desde el brote en el país el 3 de marzo de 2020 [111]. En los Estados Unidos, se generan 2,5 kilogramos de desechos médicos por cama todos los días [112]. Sin embargo, durante la pandemia de COVID-19, el aumento de la demanda de productos médicos como máscaras, batas y gafas, junto con el

hecho de que la basura doméstica generada por cama de paciente también es altamente infecciosa, resultó en un aumento importante de los desechos médicos. El volumen de desechos médicos está aumentando a un ritmo exponencial y la capacidad de almacenamiento de las salas de espera de los hospitales no puede mantenerse. En la ciudad de Nueva York, actualmente hay nueve centros de eliminación de desechos médicos con una capacidad de eliminación estimada de 12 000 toneladas por año, y el 60 % de la capacidad se utiliza para tratar desechos médicos altamente contagiosos relacionados con el COVID-19 [113].

## Capítulo 4. Resultados.

En este capítulo se presentan los casos de estudio empleados para ilustrar la aplicabilidad de los modelos de optimización desarrollados, además, se reportan y se discuten los resultados obtenidos para los distintos problemas abordados.

### 4.1 Resultados de la distribución justa de vacunas

El modelo propuesto fue implementado en el software GAMS, incluye 644 variables continuas y 616 ecuaciones para cada esquema de distribución. Los modelos para los esquemas de Bienestar Social y Rawlsiano son problemas de programación lineal y fueron resueltos con el solucionador CPLEX. Aquí, la solución óptima global está garantizada. Para el esquema de Nash, el modelo es un modelo de programación no lineal y se resolvió utilizando el solucionador LINDOGLOBAL.

Primero, podemos observar las vacunas compradas con diferentes capacidades de inversión en la **Figura 4.1** Considerando que esta cantidad de vacunas compradas es igual para todos los escenarios. Tomando en cuenta que las barras grises representan la capacidad de inversión más baja, las barras naranjas una capacidad intermedia y las barras azules se refieren a la inversión más alta. Antes de analizar los resultados, es importante recordar que los estados están ordenados según su población (ver **Tabla 3.2**). Los resultados se muestran en términos de satisfacción, donde es más fácil ver qué estados se benefician más sin considerar la población total. La **Figura 4.2** presenta la distribución de vacunas para los diferentes estados para el primer escenario (el más ideal de todos). Aquí se observa cómo el régimen de bienestar social favorece mucho a los estados 1 y 2 (los estados con mayor población). Esto evita la distribución de vacunas a aquellos estados con menor población, pero no tan pequeños como los estados 27, 28, o incluso el estado 32, donde obtener altos niveles de satisfacción implica menos vacunas distribuidas (eso significa un nivel de satisfacción muy bajo para el resto). En el caso del esquema Rawlsiano, los niveles de satisfacción son mayores en los estados con menor población (ver **Figura 4.2**). Sin embargo, todavía hay niveles de satisfacción extremadamente bajos (cerca de 0) para un número significativo de estados. Cabe señalar que una característica importante del esquema Rawlsiano es que se maximizan los beneficiarios asignados más pequeños. Esto da como resultado una distribución proporcional mínima para todos los interesados. Sin embargo,

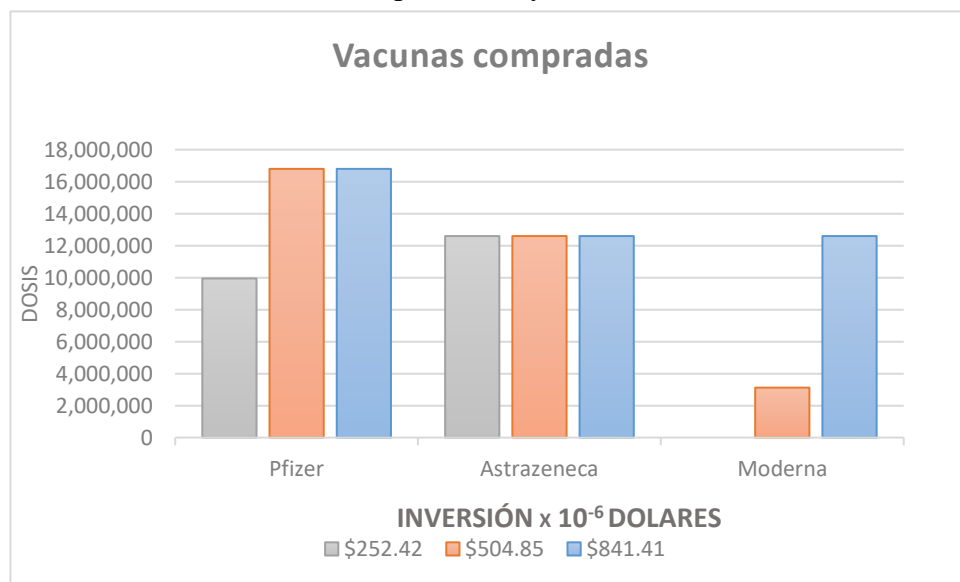
cuando el presupuesto varía, se pueden observar preferencias hacia ciertos actores debido a la degeneración de la solución Rawlsiana [38]. Por otro lado, la solución al modelo de Nash obtiene resultados más ordenados según la población (ver **Figura 4.2**). Sin embargo, en este primer escenario, tiende a favorecer a los estados con menor población (similar al enfoque Rawlsiano), con la diferencia de que este enfoque no deja niveles de satisfacción de 0. Cabe señalar que, para algunos estados, hay pequeños cambios en las asignaciones cuando hay más inversión, pero esta variación no es visible ya que los resultados se dan en términos de satisfacción y no en términos de número de vacunas.

En el escenario 2, se suman los factores de pérdida. Se nota claramente cómo los índices de satisfacción disminuyen en general para todos los estados (ver **Figura 4.3**). Se destaca en la **Tabla 3.4** la tendencia existente de que cuanto mayor es la población, mayor es la tasa de criminalidad. Por tanto, los primeros estados son los más afectados en su índice de satisfacción. Para este escenario, podemos observar que, independientemente del esquema utilizado, ningún estado puede alcanzar un nivel de satisfacción de 1.

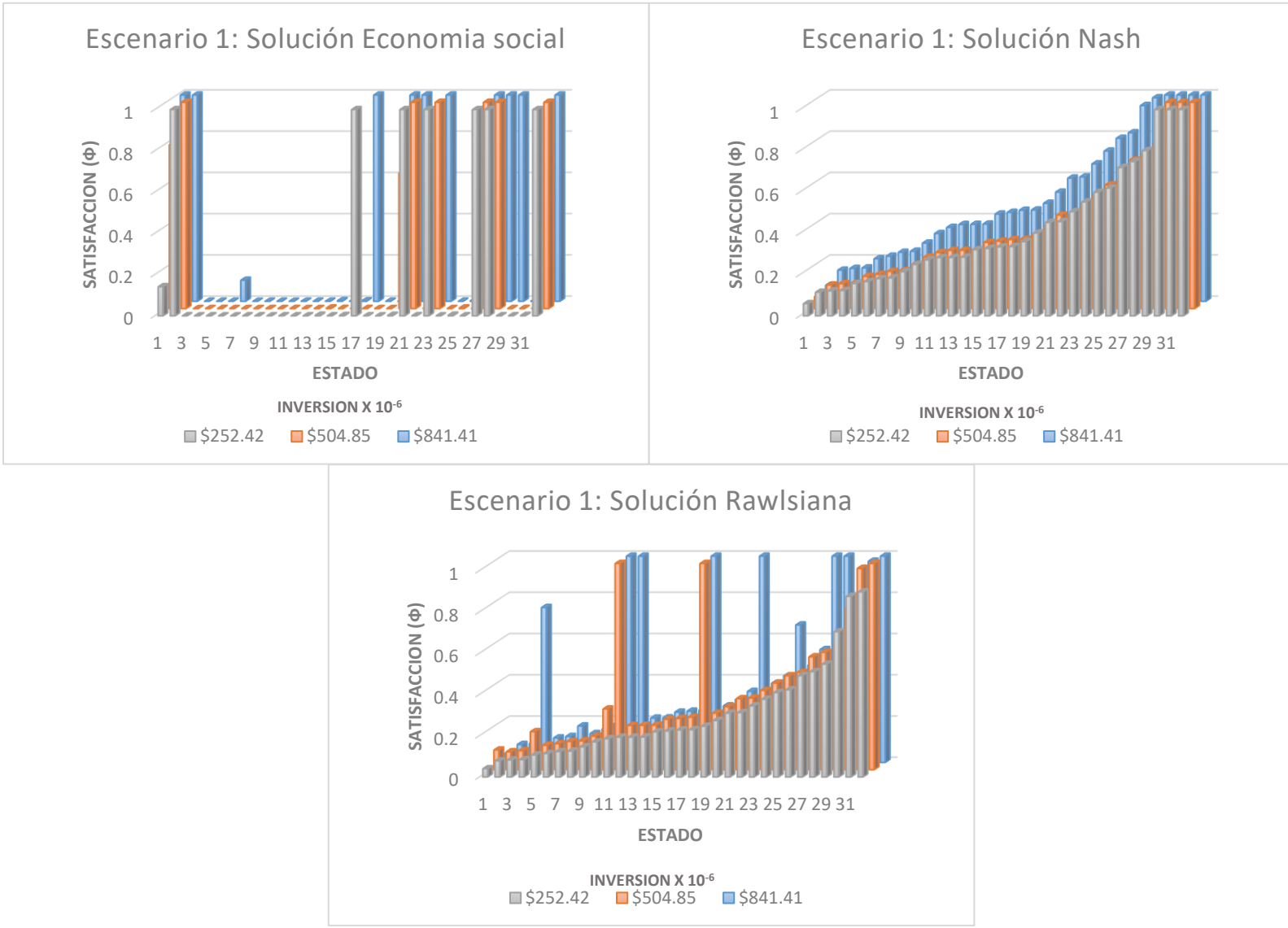
Finalmente, en el escenario 3, donde se consideran los factores de pérdida y las variables de peso, los resultados cambian significativamente en comparación con el escenario 2, donde se muestra que el uso de las variables de ponderación permite cambiar la prioridad de los estados en todos los esquemas. Vale la pena analizar el drástico cambio que sufrió el esquema de previsión social, donde ahora se priorizan aquellos estados que están en rojo o naranja en el semáforo epidemiológico (ver **Figura 4.4**). Por ejemplo, la Ciudad de México (representada como estado 2) y Coahuila (estado 15) están muy separadas entre sí. Sin embargo, ambos estados se encuentran en altos niveles de riesgo epidemiológico, por lo que el esquema de bienestar social los prioriza. Esto puede ser especialmente útil al momento de distribuir vacunas (independientemente de los cambios en la inversión) en el primer paso para reducir la tasa de infecciones por COVID-19, al tiempo que aumenta la capacidad de producción de diferentes fabricantes. Para el esquema Rawlsiano ocurre algo similar (ver **Figura 4.4**), pero este esquema no favorece a los estados en rojo. Sin embargo, tiende a favorecer a los estados en amarillo o naranja, lo que puede ser útil una vez controlados los estados rojos. Finalmente, el que quizás presenta menos cambios es el esquema de Nash (ver **Figura 4.4**). Aquí, sigue presentando forma de "escalera", pero con ciertos "picos" que

indican los estados en rojo, o con casos más activos. Por ejemplo, Ciudad de México (representada como estado 2) y Baja California Sur (estado 14). Aun así, las penalizaciones a los otros estados no son significativas en comparación con los otros esquemas, lo que puede ser bastante útil una vez controlados los estados de mayor prioridad (estados en rojo) ya que la distribución es más sistemática. Por otro lado, en la **Figura 4.5** se muestran los resultados de la distribución de vacunas si la densidad poblacional fuera la variable que pondera la distribución, sin embargo, existe un alto grado de diferencia entre los diferentes estados cuando a densidad poblacional se refiere, por lo que la distribución tiende a favorecer a un estado sobre otro de forma muy radical.

La **Figura 4.1** muestra que, a menos que el presupuesto no sea una limitación, las vacunas Moderna deberían ser la última opción para comprar, mientras que las vacunas AstraZeneca y Pfizer son las más viables. Exclusivamente para presupuestos especialmente bajos, se deben elegir las vacunas AstraZeneca porque son las más baratas (ver **Tabla 3.6**). Sin embargo, existe una desventaja; la capacidad de producción de un solo fabricante puede no ser suficiente, por lo que otros fabricantes deben ser empleados. La minimización de costos permite observar que es posible reducir significativamente los costos (alrededor del 40%) sin reducir drásticamente los niveles de satisfacción, siempre que exista una alta disponibilidad de vacunas fabricadas por Pfizer y AstraZeneca

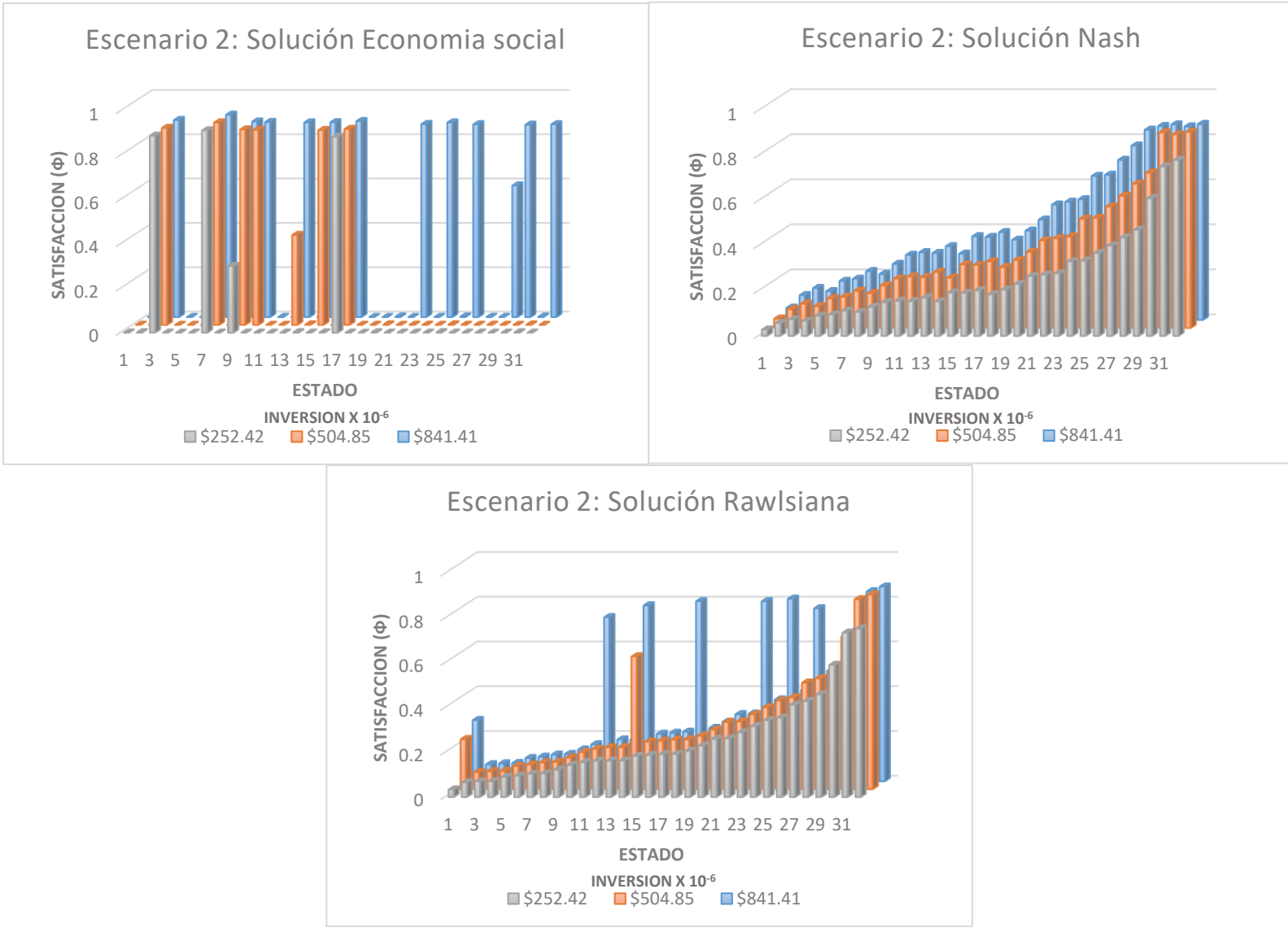


**Figura 4.1.** Vacunas compradas con diferentes capacidades de inversión (para todos los escenarios).

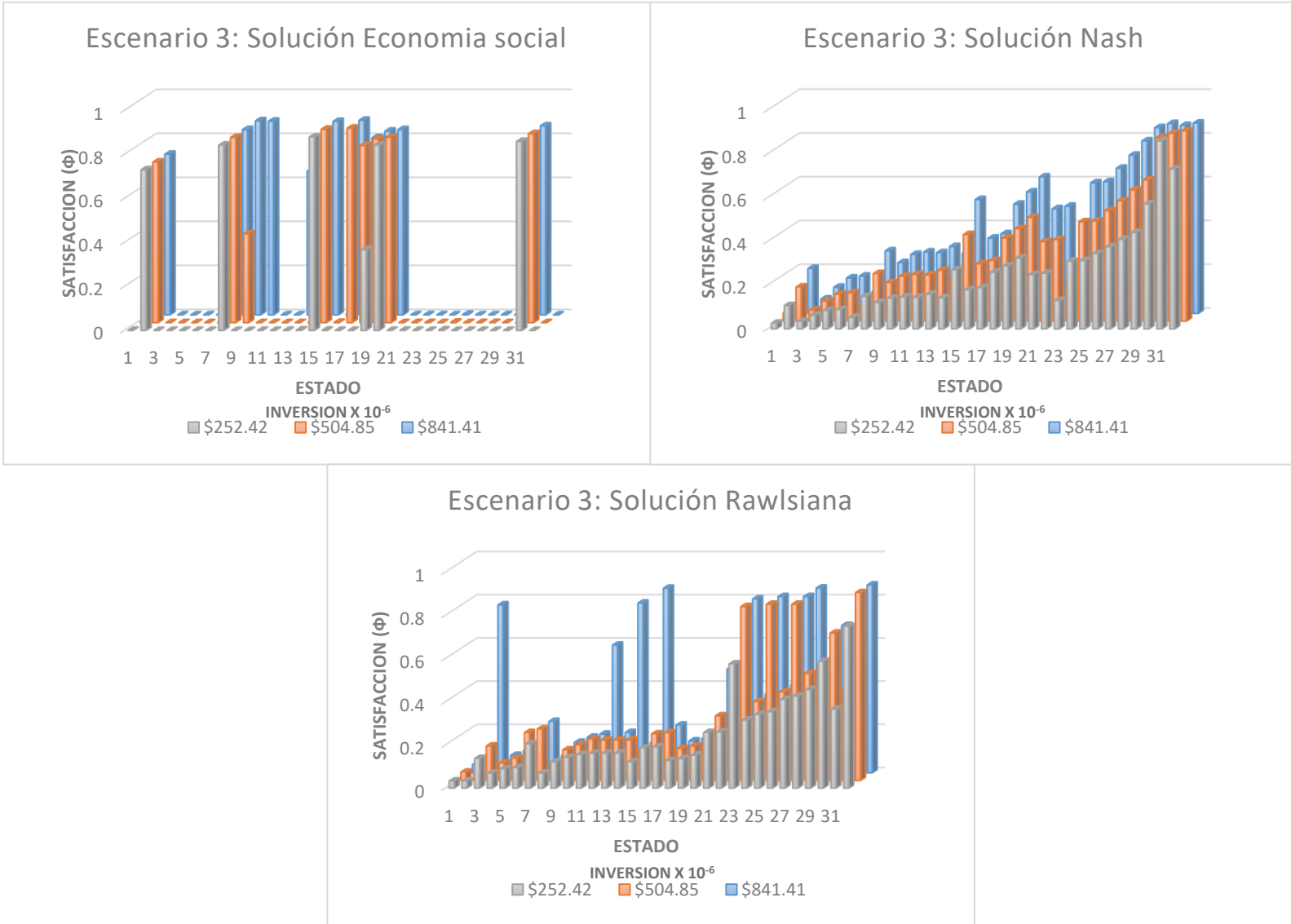


**Figura 4.2.** Escenario 1: Soluciones de Pareto para la asignación de vacunas con diferentes esquemas de distribución y capacidades de inversión sin pérdida de vacunas y variables de peso iguales a 1 (Escenario ideal).

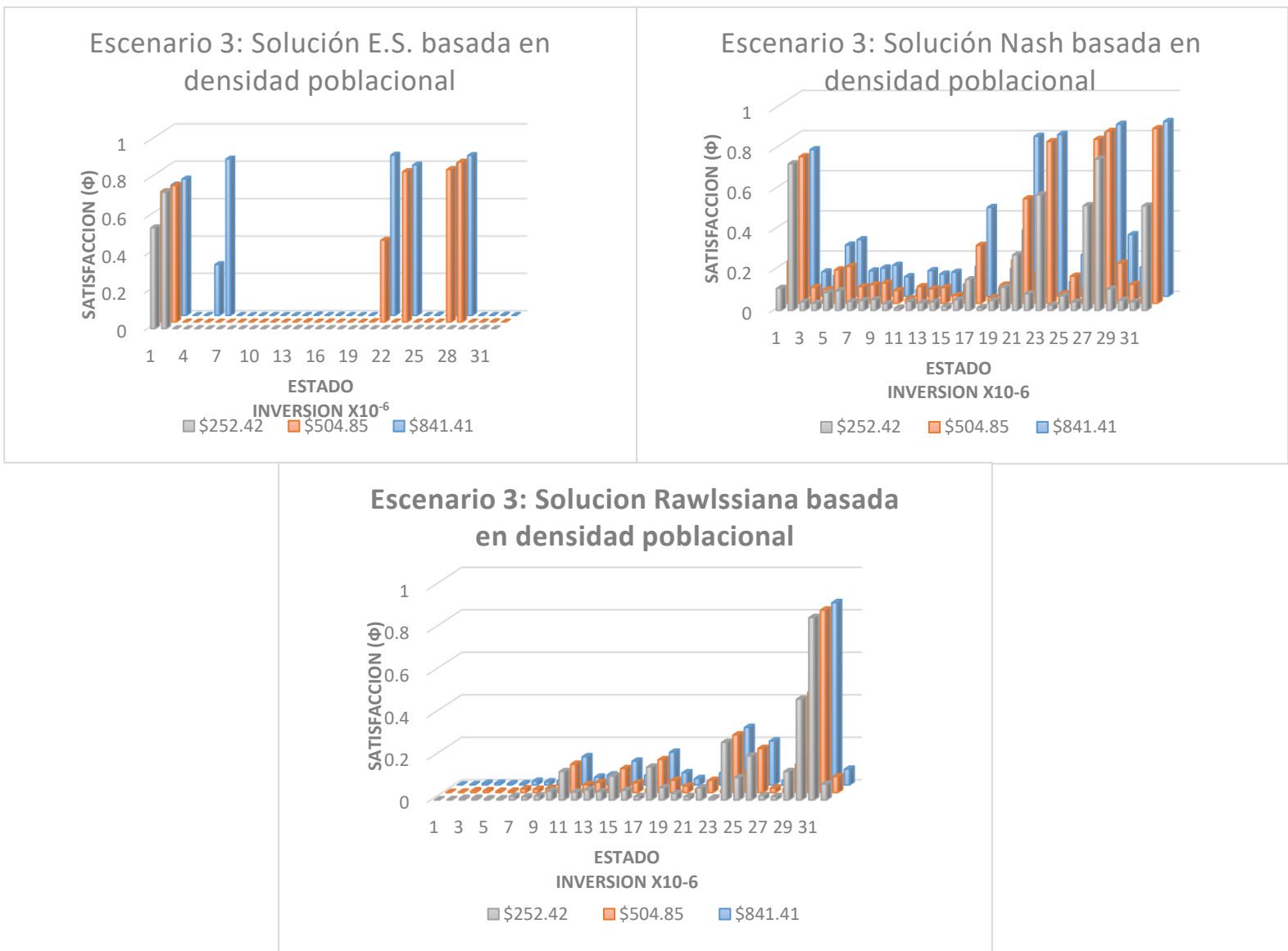




**Figura 4.3.** Escenario 2: Soluciones de Pareto para la asignación de vacunas con diferentes esquemas de distribución y capacidades de inversión con pérdida de vacunas y variables de peso iguales a 1.



**Figura 4.4.** Escenario 3: Soluciones de Pareto para la asignación de vacunas con diferentes esquemas de distribución y capacidades de inversión con las vacunas perdidas y las variables de peso consideradas.



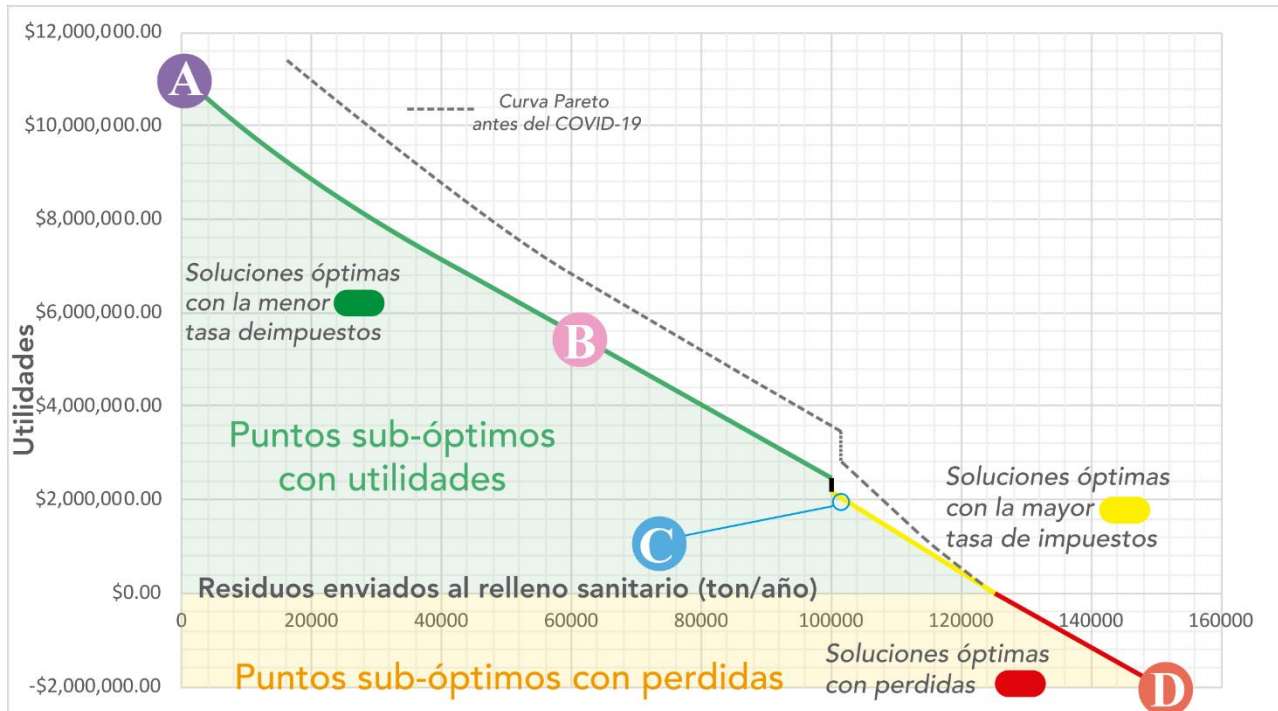
**Figura 4.5.** Escenario 3: Soluciones de Pareto para la asignación de vacunas con diferentes esquemas de distribución y capacidades de inversión con las vacunas perdidas, ponderando en función de la densidad poblacional.

## 4.2 Resultados de la gestión de RSU

La formulación del modelo matemático para la gestión de RSU relacionado con el caso de estudio seleccionado (Ciudad de Nueva York) consta de 317 variables continuas, 63 variables binarias y 341 ecuaciones. El modelo resultante es un problema de programación lineal mixto-entero (MILP). Se resolvió mediante el entorno de modelado GAMS con un tiempo de solución insignificante utilizando el resolvidor CPLEX y un procesador AMD 5600x a 4.5 GHz con 16 GB de RAM a 4000 MHz. La implementación de una máquina de aprendizaje para la predicción de los parámetros en años posteriores a la ejecución de la estrategia fue llevada a cabo en Spyder, empleando modelos de predicción del tipo Lineal, Polinomial, SVR y Bosques aleatorios para las distintas variables a predecir, las variables fueron almacenadas en hojas de cálculo de Excel para posteriormente ser exportadas a GAMS.

De todas las posibles soluciones, 4 de ellas se seleccionan para un análisis más detallado (ver **Figura 4.6**). Empezando por la solución A que es un caso hipotético donde todos los RSU se envían a procesamiento, eliminando los gastos e impuestos asociados con el envío de los residuos al relleno sanitario. En esta solución, la capacidad de procesamiento de cada una de las instalaciones de reciclaje tendría que ser inmensamente grande, lo cual es bastante difícil de implementar. Por otro lado, existe la solución B (que se mantiene en la región de la tasa de impuestos mínima de 2 \$ US / tonelada). En esta solución, menos de la mitad de los residuos se envía al relleno sanitario, y las capacidades de procesamiento no son excesivamente grandes como resulta en la solución A. La solución C se encuentra en la región con mayor tasa de impuestos que promueve el reciclaje. (5,1 \$ US / tonelada) propuesto por Munguía-López y cols., [11] En esta solución se envían más de 100,000 toneladas de basura al relleno sanitario, sin embargo, es económicamente viable, ya que sigue generando utilidades. En la solución D, que produce pérdidas económicas anuales, se envía una cantidad aún mayor de basura al relleno sanitario, haciendo que los costos de inversión necesarios para la implementación de las plantas procesadoras superen las ganancias que se podrían obtener (ver **Figura 4.7**). Por otra parte, el modelo se resuelve utilizando datos anteriores a la pandemia [69, 70, 71], en los que, como era de esperar, se obtienen mejores ingresos, principalmente por una menor generación de residuos de bajo potencial económico, como

los orgánicos y desechos médicos [114, 115].



**Figura 4.6.** Curva de Pareto para un sistema de instalaciones de procesamiento basado en residuos sólidos urbanos.



**Figura 4.7.** Distribución de costos y ventas de la cadena de suministro en base a residuos sólidos.

La **Figura 4.7** presenta una muestra de la distribución de gastos y ventas para diferentes soluciones. En todos los escenarios, los costos más altos resultan del transporte y separación de los residuos, por lo que es necesario resaltar que la distancia a la que se encuentra la fuente de residuos del centro de procesamiento afecta directamente la viabilidad de la estrategia. Al respecto, Santibañez-Aguilar *et al.* [13] propusieron una estrategia de optimización donde las diferentes instalaciones de procesamiento se ubicaban en diferentes ciudades. Por ello, las distancias entre instalaciones en algunos casos eran bastante grandes, lo que hacía que algunos residuos como el vidrio no fueran convenientes de reciclar, ya que los costes de separación y transporte superaban los posibles ingresos a obtener reciclándolo. En cuanto a los costos de tratamiento, como era de esperar, estos aumentan dependiendo de las cantidades de residuos a procesar, mientras que los impuestos disminuyen a medida que se reciclan más residuos. Se observa que los impuestos en los primeros tres casos influyen significativamente, mientras que para el resto de escenarios se vuelve insignificante frente al resto de los costos. Probablemente el cambio en la tasa de impuestos permita aumentar la tasa de residuos orgánicos y médicos destinados a la producción de energía, lo cual es visible desde la solución C. Los principales ingresos provienen del reciclaje de residuos inorgánicos, por lo que, desde un punto de vista económico, podría ser mejor desechar los residuos destinados a producir energía y composta, para reducir los costes asociados a la separación y tratamiento de estos residuos. Sin embargo, desde el punto de vista ambiental, la cantidad de residuos enviados al relleno sanitario aumentaría drásticamente, lo que provocaría un impacto ambiental y social negativo, ya que dentro de estos residuos se encuentran los generados a causa de la lucha contra el COVID-19 [73].

#### **4.2.1 Análisis de residuos electrónicos**

En esta sección se analizarán los resultados para residuos metálicos. Las **Figuras 4.8** y **4.11** muestran los diagramas de flujo específicos para el procesamiento de residuos sólidos, mientras que las **Figuras 4.10** y **4.13** comparan los diferentes costos y ventas con los otros tipos de residuos. Para las soluciones B y C, los residuos electrónicos son los que menos gasto producen debido a la baja cantidad de residuos generados anualmente en comparación con los otros tipos. Sin embargo, no es el que menos beneficio produce, principalmente por lo caras que pueden ser las nuevas materias primas generadas. Por lo tanto, los desechos electrónicos son una parte importante de los ingresos generados. Se observa que el cambio

en la tasa de impuestos no afecta la cantidad de residuos electrónicos que se envía para ser procesado. Pero, en el escenario B, aunque las cantidades de residuos electrónicos que se envían al vertedero son similares, la tasa de impuestos que se aplica es la más baja (debido a la disminución de las cantidades de residuos enviados de otros materiales), lo que aumenta en gran medida los beneficios generados por el tratamiento de los residuos electrónicos.

#### **4.2.2 Análisis para metales**

A continuación, se discuten los resultados en los escenarios B y C para residuos metálicos. Sin duda, gracias al procesamiento de metales, la estrategia produce ganancias, tanto en el escenario B como en el C. Los desechos de metales por sí solos producen más de la mitad de las ganancias (ver **Figuras 4.10 y 4.13**). En los precios por tonelada de materiales \*nuevos se observa que los metales son los más caros. Las soluciones B y C descartan el uso de tecnologías como la hidrometalurgia y la pirometalurgia, posiblemente porque tienen un factor de eficiencia de procesamiento menor que la refundición, además de que la **Tabla 3.9** muestra que son significativamente más costosas en términos de inversión. Sin embargo, los costos variables son incluso menos de la mitad de los costos de refundición. En comparación con los desechos electrónicos, si bien sus productos generados obtienen los mismos beneficios por tonelada, en este caso implementando una tasa de impuestos más baja, si afecta significativamente las cantidades de desechos metálicos que se envían al vertedero, reduciéndola en cerca de un 50%. Del mismo modo, la menor tasa de impuestos favorece en gran medida los posibles beneficios a obtener del procesamiento de metales, reduciendo los impuestos a pagar por un factor de 5 comparando las soluciones B y C.

#### **4.2.3 Análisis para papel**

Al analizar las soluciones para el procesamiento de papel, se observa el uso de dos tecnologías. Aunque el objetivo es el mismo (generar papel reciclado), desde el punto de vista económico y ambiental son completamente diferentes. El papel reciclado a partir de tecnologías libres de agua genera un impacto ambiental favorable ya que reduce las enormes cantidades de agua requeridas para reciclar papel [116]. Sin embargo, el precio a pagar es bastante alto, ya que desde el punto de vista económico es 4,5 veces más caro invertir en tecnología sin agua que en tecnología con agua, y el coste de producir una tonelada de papel es unas 30 veces superior, lo que supone un alto consumo de energía eléctrica debido al uso



de máquinas de reciclaje libres de agua [45]. Esto podría no ser amigable con el medio ambiente, por lo que el uso simultáneo de ambas tecnologías es más favorable. Por un lado, es factible obtener un beneficio económico utilizando tratamientos en base agua y un beneficio ambiental utilizando tratamientos sin agua. En cuanto a los impuestos, la reducción de la tasa de impuestos favorece un aumento en la producción de papel reciclado en un tercio (solución B). Por otro lado, se observa que, al aumentar las cantidades de residuos, se favorece el uso de tecnologías de reciclaje que utilizan agua, para maximizar las ganancias.

#### **4.2.4 Análisis para vidrio**

En cuanto al vidrio, para cualquiera de las soluciones, los gastos inherentes al transporte, separación y tratamiento son bastante caros, frente a las posibles ganancias por venta de vidrio nuevo producido. Por tanto, la solución lógica podría ser enviar todos los residuos de vidrio al vertedero. Sin embargo, la variabilidad en la tasa de impuestos provoca una tendencia hacia la reducción de los residuos enviados a vertedero. Por ello, conviene reciclar una parte de estos residuos de vidrio, para quedar por debajo de las 100.000 toneladas anuales de residuos enviados a vertedero. Si se comparan las soluciones B y C, la solución C paga alrededor de 3 veces más impuestos que la solución B, ya que el procesamiento aumenta alrededor de un 20 %. Debido a los altos costos de transporte y separación, una posible forma de reducir los gastos y aumentar las ganancias podría ser ubicar las instalaciones de procesamiento en una ubicación diferente y más cercana a la fuente de los desechos.

#### **4.2.5 Análisis para plástico**

Las soluciones B y C para plástico son las que más difieren. En la solución C solo se procesa plástico mediante reciclaje mecánico para la producción de pellets, mientras que para la solución B se incorpora el reciclaje químico, descartándose en ambos escenarios la producción de nanotubos por los altos costos de inversión asociados. En comparación con las soluciones de residuos de vidrio, algo similar sucede con el plástico, las ganancias son bajas, en comparación con el procesamiento de otros residuos como el metal o incluso el papel, además de ser el residuo que genera más gastos en separación y transporte (ver **Figura 17 y 20**). La tasa de impuestos más baja afecta significativamente la cantidad de residuos plásticos que se envían al vertedero, ya que de la solución C a la solución B hay una disminución del 46 %. En la solución B se produce una pequeña cantidad de aceite de

pirólisis, lo que representa un ingreso mínimo. Sin embargo, si se requiere procesar más residuos plásticos, la producción de aceite de pirólisis aumentaría debido a los costos de producción inherentes al proceso, que son más bajos que los de la producción de pellets (ver **Tabla 3.11**).

#### **4.2.6 Análisis para residuos médicos**

Debido a la pandemia del COVID-19, los desechos médicos han ganado relevancia y volumen, por lo que estos desechos requieren una atención especial. En diferentes regiones se ha optado por la incineración de este tipo de residuos, debido a lo dañinos que pueden ser estos residuos para el ser humano [113]. Sin embargo, para este trabajo se implementan diferentes tecnologías de procesamiento que pueden ser de utilidad. Ilyas et al. [47] propusieron el uso de tecnologías como la incineración, el tratamiento químico y el tratamiento térmico alternativo para la desinfección de residuos, tecnologías que se han incorporado en este trabajo. Para la solución C (ver **Figura 4.12**), el tratamiento químico y el tratamiento térmico alternativo se utilizan como tecnologías de desinfección de desechos médicos, que alternativamente también producen energía, aunque, comparando las ganancias de las ventas de energía, son muy pequeñas (ver **Figura 4.7**). La **Tabla 3.9** muestra que los desechos médicos constituyen la mayor parte de los desechos generados por la ciudad, esta fracción se ha incrementado debido a la actual pandemia de COVID-19. Por tanto, para la estrategia presentada, implica que este incremento de residuos aumenta más la tasa de impuestos. La cantidad de residuos generados es tan grande que difícilmente podría ser procesado en su totalidad, por lo que se requiere un relleno sanitario especial para este tipo de residuos. En la solución B, los residuos enviados al relleno sanitario especial se reducen aproximadamente a la mitad. Sin embargo, las ganancias no aumentan significativamente, pero vale la pena señalar que el principal beneficio del procesamiento de estos residuos radica en el beneficio social. Además, en ambas soluciones se sugiere descartar la incineración, tecnología que produce más emisiones de químicos tóxicos para los humanos [117].

#### **4.2.7 Análisis para residuos orgánicos**

Finalmente, para los residuos orgánicos, el proceso genera dos tipos de ingresos: los asociados a la producción de material para compostas y los relacionados con la producción de energía eléctrica. Para cualquiera de las soluciones, las ganancias inherentes a la parte

agrícola son siempre mayores. En escenarios donde se aplica el impuesto más alto, la cantidad de residuos orgánicos procesados es mínima, mientras que cuando se aplica un tipo impuesto menor, adquiere mayor relevancia, y las ganancias del procesamiento de estos residuos cobran importancia (ver **Figura 4.7**). Al igual que en el análisis anterior, se descarta la incineración mientras que el proceso de pirólisis y la gasificación se seleccionan como tecnologías para las soluciones B y C, y seguido a los residuos médicos, los residuos orgánicos son uno de los más generados, por lo que su procesamiento es fundamental para lograr una menor tasa de impuestos.

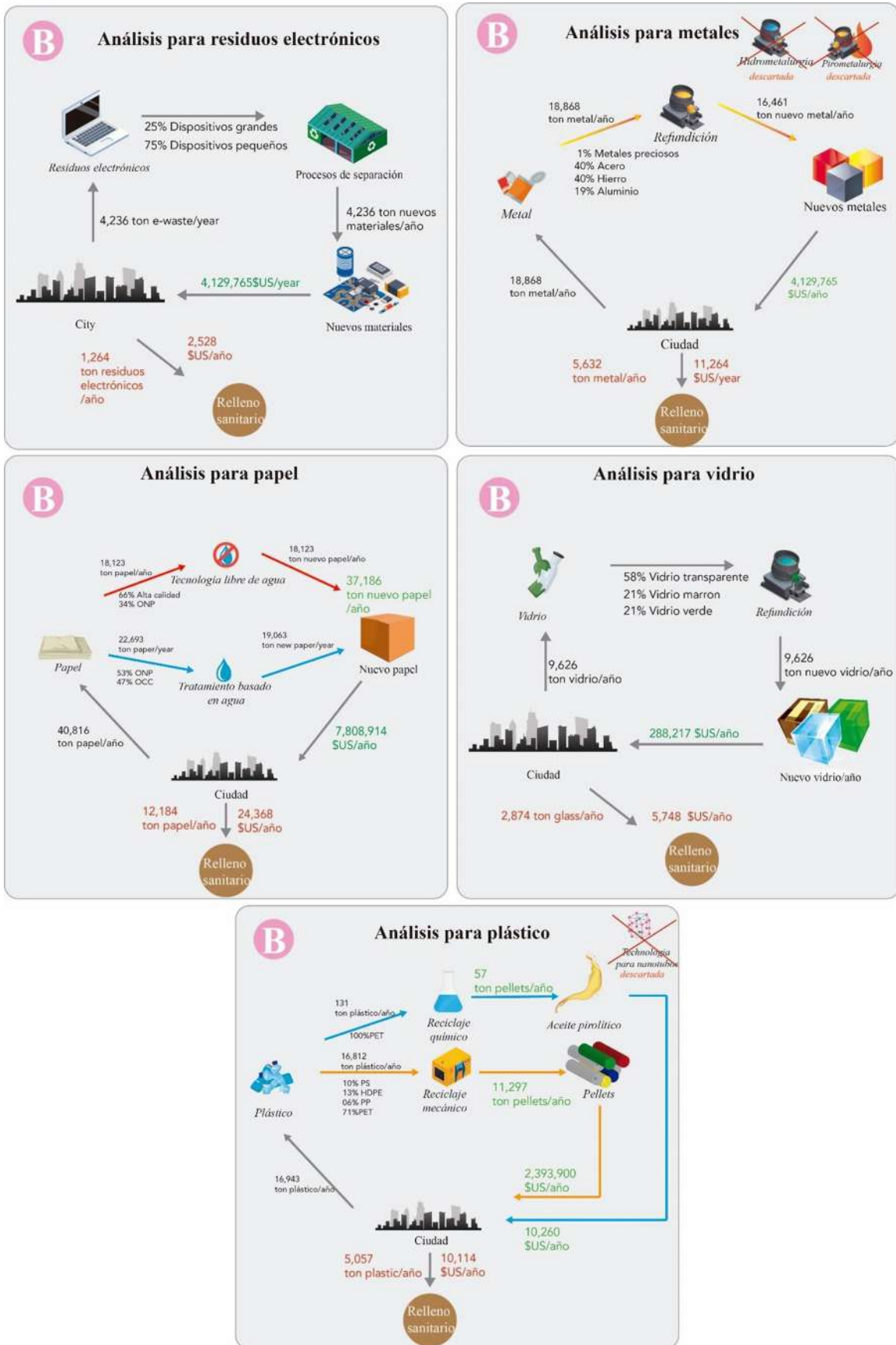


Figura 4.8. Solución B: Análisis de residuos inorgánicos.

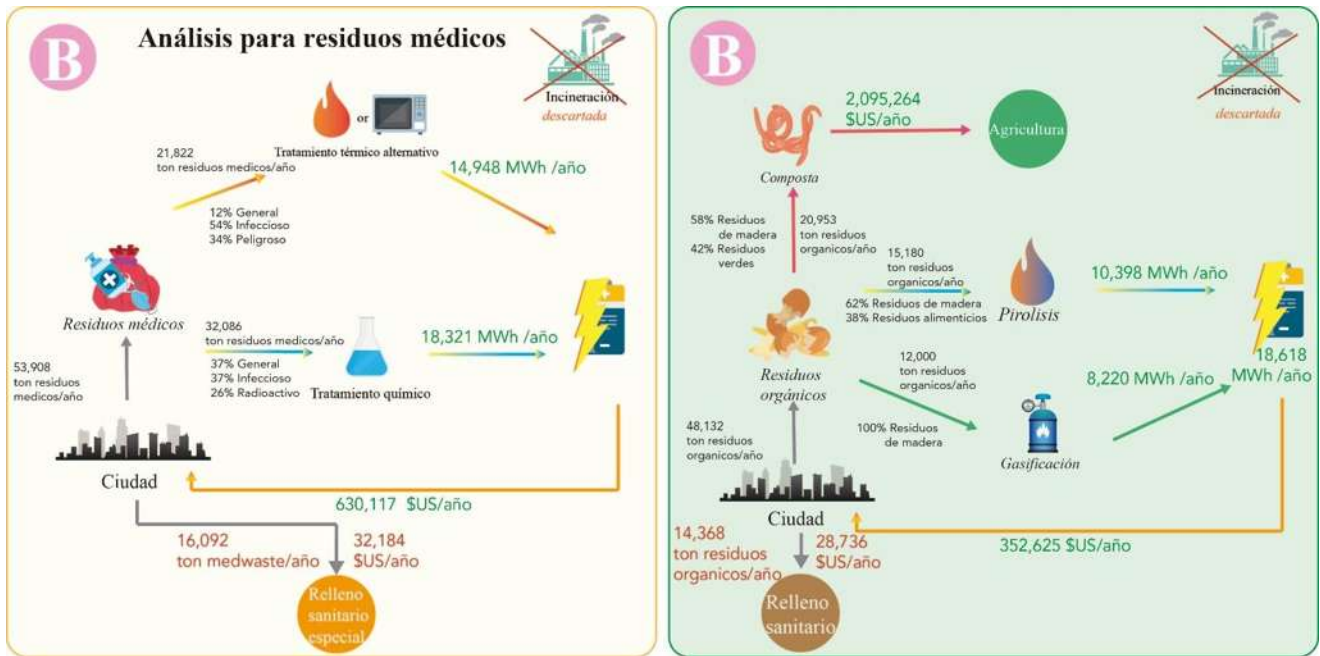


Figura 4.9. Solución B: Análisis de residuos médicos y residuos orgánicos.

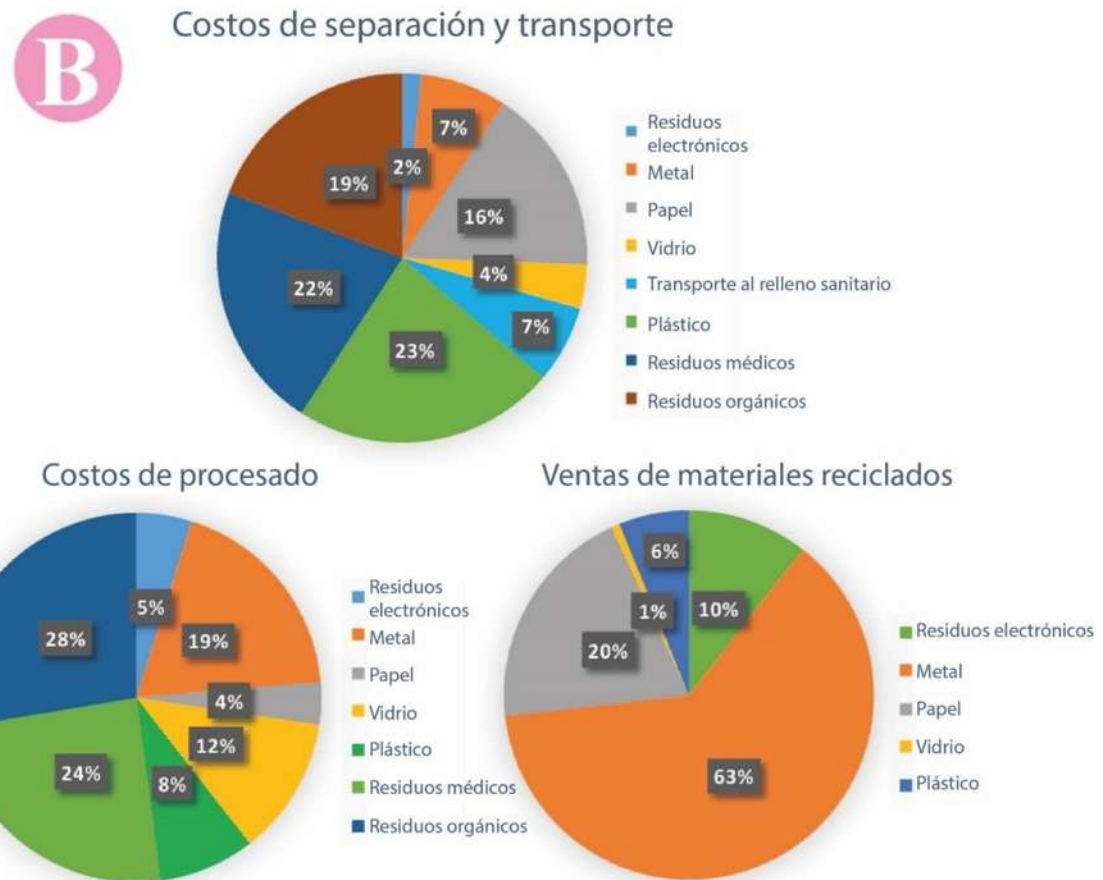


Figura 4.10. Solución B: Distribución de costos y ventas para diferentes tipos de RSU.

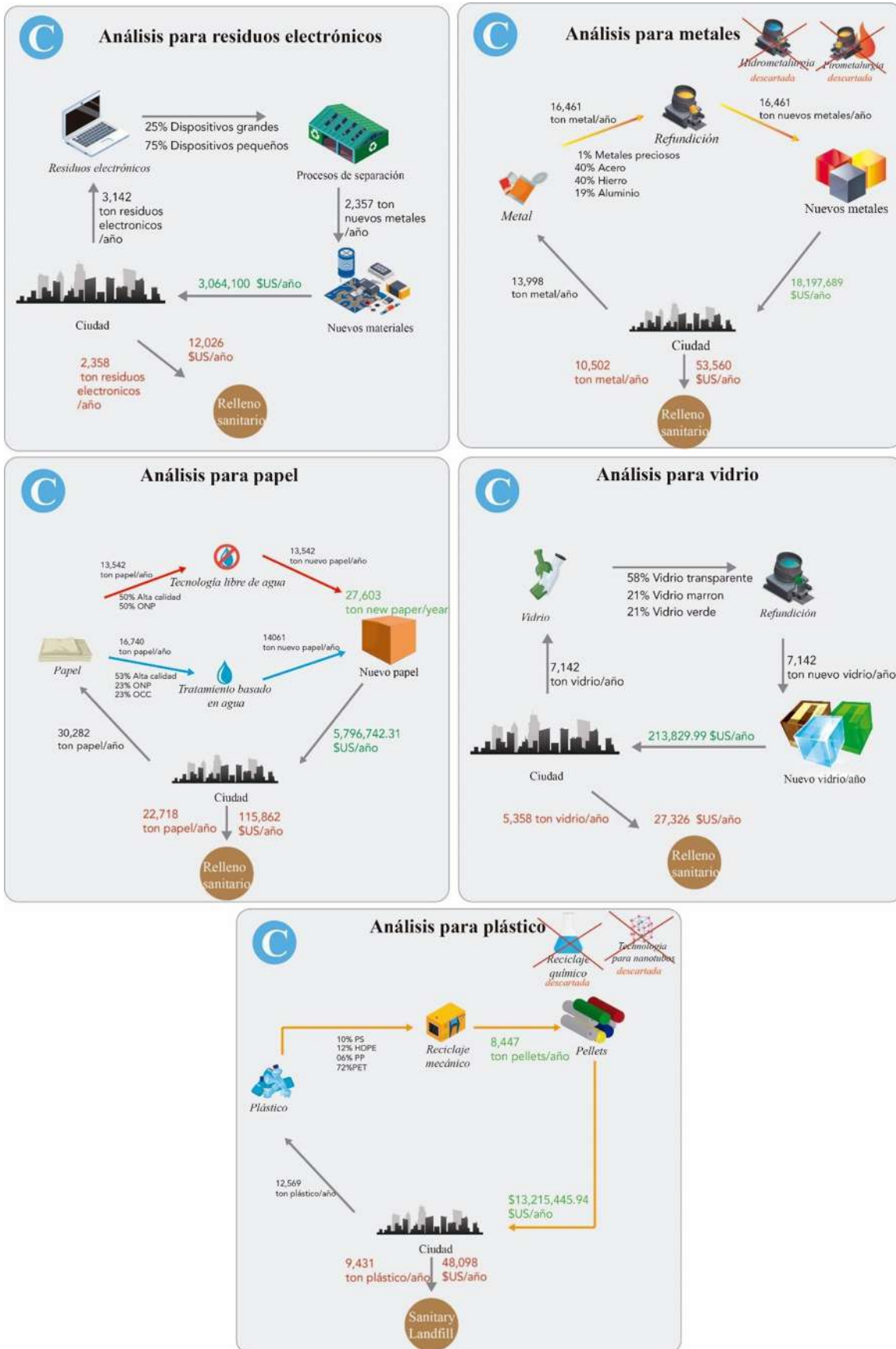


Figura 4.11. Solución C: Análisis de residuos inorgánicos.

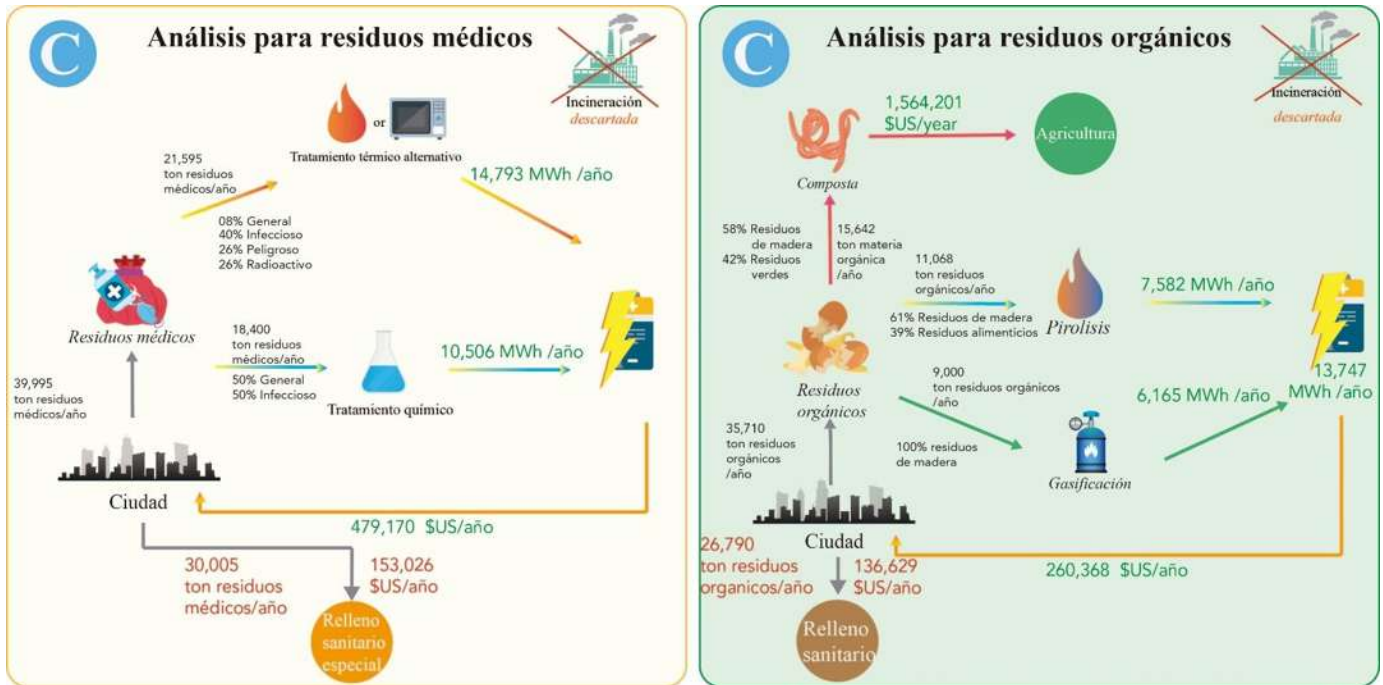


Figura 4.12. Solución C: Análisis de residuos médicos y residuos orgánicos.

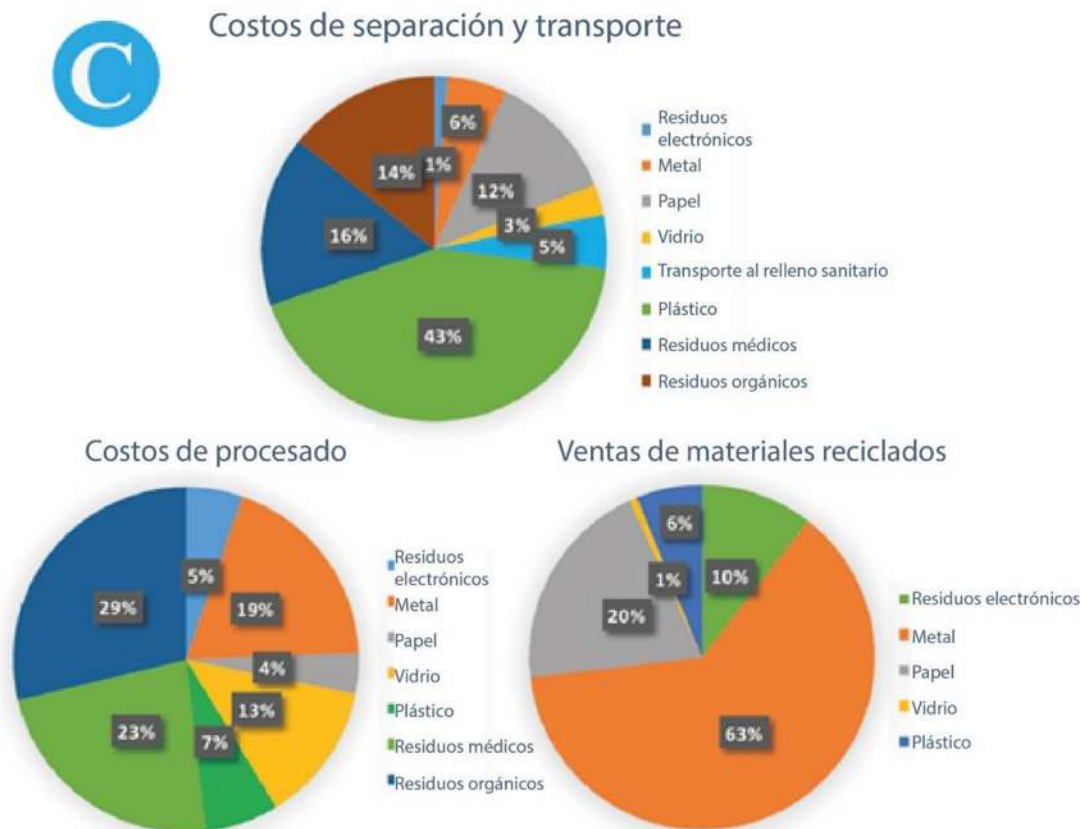
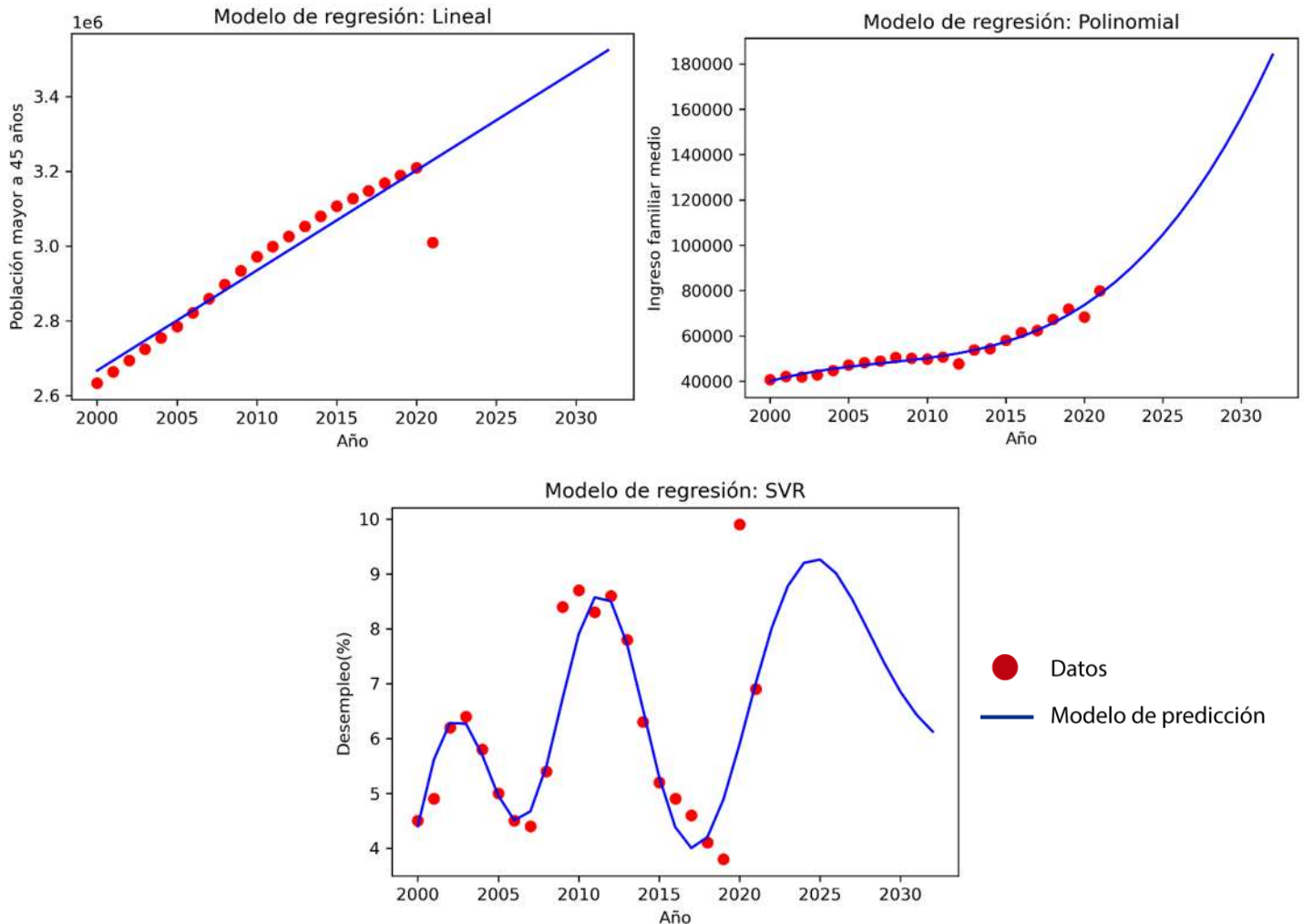


Figura 4.13. Solución C: Distribución de costes y ventas para diferentes tipos de RSU.

#### 4.2.8 Planeación estratégica de largo plazo con máquinas de aprendizaje

La implementación de las máquinas de aprendizaje a la estrategia permite observar los beneficios a largo plazo, la máquina de aprendizaje fue entrenada tomando el conjunto de datos de la **Tabla 3.14** donde se obtienen los modelos de predicción mostrados en la **Figura 4.14** tomando como criterio pruebas de significancia estadística y el coeficiente de determinación ajustado para la selección del respectivo modelo de regresión.

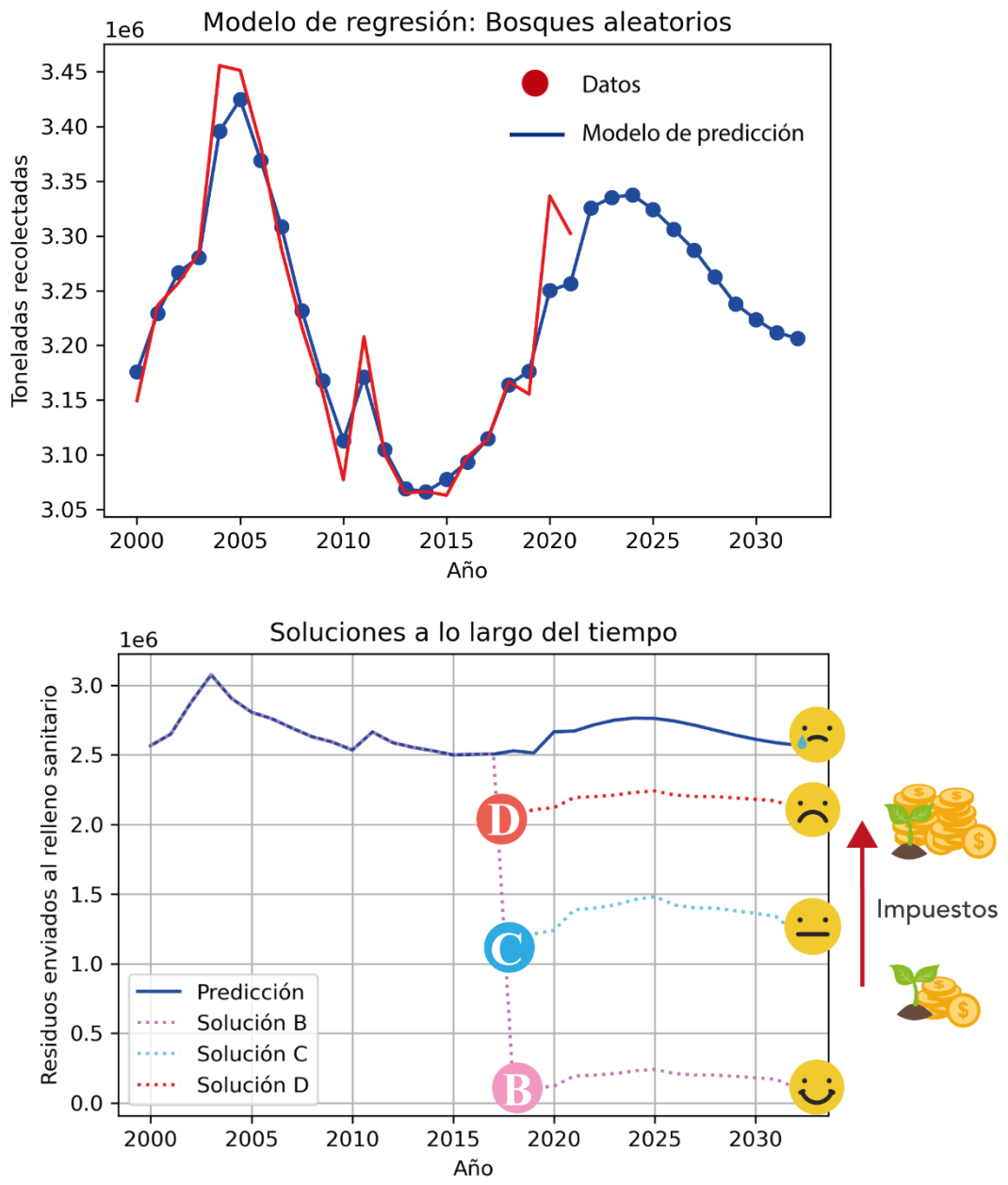


**Figura 4.14.** Modelos de regresión del conjunto de datos independientes.

Con los modelos de regresión establecidos resulta posible elaborar un modelo de aprendizaje automático que emplea un algoritmo de bosques aleatorios el cual busca predecir las cantidades de residuos sólidos recolectados y los residuos enviados al relleno sanitario año por año. En la **Figura 4.15** se observa el ajuste obtenido de la máquina de aprendizaje además del conjunto de soluciones B, C y D, vale la pena destacar que la solución A se



encuentra sobre el eje del tiempo donde todos los residuos son procesados. Para este caso en particular se propone el año 2018 para la implementación de la estrategia con el fin de comparar los resultados con un mayor plazo, donde se observa que sin importar la solución planteada, existe un incremento en la cantidad de residuos enviados al relleno sanitario cerca del año 2020, esto debido a inicio de la pandemia COVID-19 en la región de New York, sin embargo, las cantidades de residuos enviadas al relleno sanitario disminuyen de manera bastante significativa incluso para la solución D, que por otro lado, tomando en cuenta el riesgo asociado a los residuos generados en durante la pandemia, la solución D representa la solución con el beneficio social más bajo, además de ser la que más impuestos genera, lo que hacen de las soluciones B y C como las más viables, ya que existe un mejor balance entre los beneficios económicos y sociales como se observó previamente en las **Figuras 4.6 y 4.7**.



**Figura 4.15.** Modelo de aprendizaje automático para la predicción de toneladas de residuos recolectados y residuos enviados al relleno sanitario.

## **Capítulo 5. Conclusiones**

En este capítulo se presentan las conclusiones del análisis de los problemas abordados. Primero, se discute sobre las conclusiones generales para diferentes sistemas utilizando las estrategias de optimización discutidas. Luego, se presentan las conclusiones específicas para cada tema. Finalmente, se destacan las contribuciones a la investigación.

### **5.1 Conclusiones generales**

De manera general, es posible concluir que, el uso de distintas estrategias de optimización multi-objetivo para la preservación de la calidad de vida en condiciones de pandemia pueden ofrecer distintas alternativas para atender los problemas generados por el COVID-19 lo cual puede facilitar la toma de decisiones. Se propusieron diferentes modelos matemáticos para atender distintas áreas donde más ha afectado la pandemia COVID-19. Como primer parte del desarrollo de tesis se presentó una estrategia multi-objetivo para la distribución justa de vacunas, implementado esquemas de justicia y parámetros sociales. Al considerar los esquemas de justicia, se encontró que cada esquema de justicia puede ser útil en función de la etapa de vacunación presente en la región donde se desea implementar la estrategia. Como segunda parte de este trabajo se presentó un marco circular de gestión de residuos que incorpora un impuesto variable verde, que resulta capaz de promover el tratamiento de los RSU para la producción de energía y nuevos materiales. Esto minimiza los impactos ambientales y sociales, dando especial énfasis a los residuos generados por la pandemia del COVID-19 empleando estrategias basadas en la intensificación de procesos, además, con la incorporación de las máquinas de aprendizaje al modelo fue posible predecir las cantidades de residuos generados en años posteriores para realizar una simulación con los distintos escenarios planteados.

### **5.2 Conclusiones particulares**

Para la distribución justa de vacunas, se consideraron parámetros relacionados con la población, la tasa de infección por COVID-19, la tasa de mortalidad por COVID-19 y grupos de riesgo como ancianos y personas con condiciones médicas especiales (diabetes, hipertensión y obesidad). Por otro lado, la estrategia propuesta consideró los comportamientos sociales que inciden en la correcta distribución de las vacunas (como la

delincuencia) y priorizó aquellos grupos de mayor riesgo con base en el semáforo epidemiológico. Las soluciones se obtuvieron a través de diferentes esquemas de equidad (economía social, justicia Rawlsiana y Nash). La aplicabilidad del modelo presentado se ilustró utilizando México como caso de estudio. Cada estado del país fue considerado un interesado. La solución a los escenarios propuestos implicó como objetivos la distribución equitativa de las diferentes vacunas disponibles y la reducción de costos asociados a las mismas. En los resultados se pudo observar cómo los factores de pérdida relacionados con la corrupción y la delincuencia afectaron significativamente los respectivos niveles de satisfacción de cada estado. La suma de las variables de peso mostró cómo se pueden aplicar los diferentes esquemas de justicia en función de la etapa de vacunación actual. Por ejemplo, observamos que el esquema de bienestar social puede dar mejores resultados que los otros esquemas cuando existen grupos de población con alta incidencia de casos de COVID-19 (ya que se priorizaron estados con alto riesgo epidemiológico). Por otro lado, cuando la incidencia de casos no es alta, el esquema de justicia Rawlsiano puede ser una mejor opción ya que prioriza estados con mayor riesgo epidemiológico sin dejar a los demás estados sin vacunas. Finalmente, el esquema de justicia de Nash se puede utilizar una vez que se controla la epidemia, ya que se logran niveles similares de satisfacción entre los estados. Además, la asignación otorgada por este esquema proporcionó solo una pequeña ventaja a aquellos estados con mayor riesgo epidemiológico (donde esta diferencia no fue significativa). La adición de funciones de costo permitió observar la interacción entre costo-satisfacción, demostrando la utilidad del modelo para asignar diferentes tipos de vacunas disponibles en el mercado. Se identificaron las vacunas que mejor reducen los costos y se observó que es posible reducir la inversión requerida sin comprometer los niveles de satisfacción de cada estado (siempre que exista un número diverso de vacunas disponibles).

Para la gestión de residuos sólidos, se presentó un enfoque de optimización donde se los objetivos involucrados son el beneficio económico y la reducción del impacto ambiental y social generado por la pandemia del COVID-19 y el alto riesgo que representan los residuos generados para la salud. El problema se formuló como un problema de programación lineal entera mixta multiobjetivo. El modelo considera una amplia gama de opciones para procesar cada uno de los diferentes tipos de residuos, además, selecciona y asigna las capacidades de producción para las plantas de procesamiento de la tecnología seleccionada. Se ilustró la

aplicación del modelo, seleccionando la ciudad de Nueva York en los Estados Unidos como caso de estudio. Los resultados muestran que es factible implementar un parque industrial que procese todos los residuos generados. Además, la tasa de impuesto variable promueve el reciclaje de residuos, maximizando las ganancias incluso para aquellos residuos con bajo potencial económico. Las diferentes soluciones de Pareto obtenidas permiten al tomador de decisiones disponer de una amplia variedad de opciones para elegir la solución que mejor se adapta a los objetivos propuestos. La ubicación del parque industrial es clave para minimizar los costos de transporte, que, para residuos de menor potencial económico, pueden ser incluso superiores a los posibles precios de venta de sus productos asociados. Este modelo puede ser útil en regiones donde la gestión de los residuos sólidos municipales no es adecuada y existe un alto riesgo de exposición a los residuos.

### **5.3 Contribuciones a la investigación**

Las contribuciones a la investigación se pueden resumir en las siguientes publicaciones científicas, destacando la segunda publicación debido a que el resumen gráfico fue seleccionado como portada para la revista:

1. Rogelio Ochoa-Barragán, Aurora del Carmen Munguía-López and José María Ponce-Ortega. (2021). “Use of Mathematical Approaches for Addressing COVID-19 Pandemic — a Critical Review”. *Process Integration and Optimization for Sustainability* (Impact Score 1.19). DOI: 10.1007/s41660-021-00190-7
2. Aurora del Carmen Munguía-López, Rogelio Ochoa-Barragán, José María Ponce-Ortega. (2022). “Optimal waste management during the COVID-19 pandemic”. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification* (Impact Factor 4.237). DOI: 10.1016/j.cep.2022.108942
3. Rogelio Ochoa-Barragán, Aurora del Carmen Munguía-López and José María Ponce-Ortega. (Publicación en proceso). “Strategic Planning for the Optimal Distribution of COVID-19 Vaccines”. *Socio-Economic Planning Sciences* (Impact Factor 4.923)
4. Rogelio Ochoa-Barragán, Aurora del Carmen Munguía-López and José María Ponce-Ortega. (Publicación en proceso). “Revalorización de los

residuos durante la pandemia de COVID-19”. Ciencia

5. Rogelio Ochoa-Barragán, Aurora del Carmen Munguía-López and José María Ponce-Ortega. (Publicación en proceso). “Optimización matemática para hacer frente a la pandemia COVID-19”. Ciencia

En el **Apéndice A** se pueden encontrar las portadas de estas contribuciones.

## Referencias

- [1] Saadat S, Rawtani D, Hussain CM (2020). Environmental perspective of COVID-19. *Science of the Total Environment*. 728, 138870. DOI:10.1016/j.scitotenv.2020.138870
- [2] Inkster B, O'Brien R, Selby E, Joshi S, Subramanian V, Kadaba M, Mateen BA (2020). Digital health management during and beyond the COVID-19 pandemic: Opportunities, barriers, and recommendations. *JMIR Mental Health*, 7(7), e19246. DOI:10.2196/19246
- [3] Patrício-Silva AL, Prata JC, Walker TR, Duarte AC, Ouyang W, Barcelò D, Rocha-Santos T (2021). Increased plastic pollution due to COVID-19 pandemic: Challenges and recommendations. *Chemical Engineering Journal*, 405, 126683. DOI: 10.1016/j.cej.2020.126683
- [4] Silveira EA, Kliemann N, Noll M, Sarrafzadegan N, de Oliveira C (2021). Visceral obesity and incident cancer and cardiovascular disease: An integrative review of the epidemiological evidence. *Obesity Reviews*, 22(1), e13088 DOI:10.1111/obr.13088
- [5] Dwivedi YK, Hughes DL, Coombs C, Constantiou I, Duan Y, Edwards JS, Upadhyay N (2020). Impact of COVID-19 pandemic on information management research and practice: Transforming education, work and life. *International Journal of Information Management*, 55, 102211. DOI:10.1016/j.ijinfomgt.2020.102211
- [6] Star (2021) Poor medical waste management will increase infections. The Daily Star, <https://www.thedailystar.net/editorial/news/poor-medical-waste-management-will-increase-infections-1909561>, (Accessed 11 November 2021).

- [7] Matrajt L, Eaton J, Leung T, Brown E (2020) Vaccine optimization for COVID-19, who to vaccinate first? *En medRxiv: The preprint server for health sciences*. DOI:10.1101/2020.08.14.20175257
- [8] Persad G, Wertheimer A, Emanuel EJ (2009) Principles for allocation of scarce medical interventions. *Lancet*. 373(9661):423-431. DOI:10.1016/S0140-6736(09)60137-9
- [9] Munguía-López AC, Ponce-Ortega JM (2020) Fair allocation of potential COVID-19 vaccines using an optimization-based strategy. Research square DOI:10.21203/rs.3.rs-83772/v1
- [10] Paut-Kusturica M, Golocorbin-Kon S, Ostojic T, Kresoja M, Milovic M, Horvat O, Dugandzija T, Davidovac N, Vasic A, Tomas A (2020) Consumer willingness to pay for a pharmaceutical disposal program in Serbia: A double hurdle modeling approach. *Waste Management*. 104 246–253. DOI: 10.1016/j.wasman.2020.01.029.
- [11] Munguía-López AC, Zavala VM, Santibañez-Aguilar JE, Ponce-Ortega JM (2020) Optimization of municipal solid waste management using a coordinated framework. *Waste Management*. 115 15–24. DOI: 10.1016/j.wasman.2020.07.006
- [12] Santibañez-Aguilar JE, Ponce-Ortega JM, González-Campos JB, Serna-González M, El-Halwagi MM (2013) Optimal planning for the sustainable utilization of municipal solid waste. *Waste Management*. 33(2) 2607-2622. DOI: 10.1016/j.wasman.2013.08.010.
- [13] Munguía-López AC, Núñez-López JM, Ponce-Ortega JM, Identifying Fair Solutions in the Optimal Design of Integrated Residential Complexes. *Chemical*



- Engineering and Processing - Process Intensification*, 108116 (2020) DOI: 10.1016/j.cep.2020.108116
- [14] Ponce-Ortega JM, Al-Thubaiti MM, El-Halwagi MM (2012) Process intensification: New understanding and systematic approach. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 53, 63–75. DOI: 10.1016/j.cep.2011.12.010
- [15] Meyer F, Johannsen F, Liese A, Fieg G, Bubenheim P, Waluga T (2021) Evaluation of process integration for the intensification of a biotechnological process. *Chemical Engineering and Processing – Process Intensification*, 167, 108506. DOI: 10.1016/j.cep.2021.108506
- [16] Rivas DF, Castro-Hernández E, Villanueva Perales AL, Van der Meer W (2018) Evaluation method for process intensification alternatives. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 123, 221–232. DOI: 10.1016/j.cep.2017.08.013
- [17] Becht S, Franke A, Geißelmann H, Hahn (2009) An industrial view of process intensification. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 48(1), 329–332. DOI:10.1016/j.cep.2008.04.012
- [18] Strube J, Ditz M, Kornecki M, Huter A, Schmidt H, Thiess S, Zobel-Roos (2018) Process Intensification in Biologics Manufacturing. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 133 (2018) 278-293. DOI: 10.1016/j.cep.2018.09.022
- [19] Cabrera DV, Labatut RA (2021) Outlook and challenges for recovering energy and water from complex organic waste using hydrothermal liquefaction. *Sustainable Energy & Fuels*, 5(8), 2201–2227. DOI: 10.1039/d0se01857k

- [20] McGonigle P, Ruggeri B (2014) Animal models of human disease: Challenges in enabling translation. *Special Issue: Pharmacology in 21st Century Biomedical Research*, 87(1), 162-171. DOI:10.1016/j.bcp.2013.08.006
- [21] Wouters, OJ, Shadlen, KC, Salcher-Konrad M, Pollard AJ, Larson HJ, Teerawattananon Y, Jit M (2021) Challenges in ensuring global access to COVID-19 vaccines: production, affordability, allocation, and deployment. *The Lancet*, 397(10278), 1023–1034. DOI:10.1016/s0140-6736(21)00306-8
- [22] Muscogiuri G, Pugliese G, Barrea L, Savastano S, Colao A (2020) Commentary: Obesity: The “Achilles heel” for COVID-19? *Metabolism*, 108, 154251. DOI:10.1016/j.metabol.2020.154251
- [23] Lurie N, Saville M, Hatchett R, Halton J (2020) Developing Covid-19 vaccines at pandemic speed. *New England Journal of Medicine*, 382(21), 1969-1973. DOI:10.1056/NEJMp2005630
- [24] Hussain A, Mahawar K, Xia Z, Yang W, EL-Hasani S (2020) Obesity and mortality of COVID-19. *Meta-analysis. Obesity Research & Clinical Practice*, 14(4), 295-300. DOI:10.1016/j.orcp.2020.07.002
- [25] Liu K, Chen Y, Lin R, Han K (2020) Clinical features of COVID-19 in elderly patients: A comparison with young and middle-aged patients. *Journal of Infection and Public Health* .80(6), e14-e18. DOI:10.1016/j.jinf.2020.03.005
- [26] OMS (2020) La carrera por una vacuna contra la Covid-19, OMS, Disponible en: <https://bit.ly/2VFPv8c> Consultado el 1 de diciembre 2020
- [27] Mullard A (2020) How COVID vaccines are being divvied up around the world. *Nature*. DOI:10.1038/d41586-020-03370-6

- [28] Torres-Ramírez C, Orozco-Rivera E (2020) Covid-19. Vacunas y vacunación notas estratégicas, 118  
<http://bibliodigitalibd.senado.gob.mx/handle/123456789/5079> Consultado el 1 de diciembre 2020
- [29] OXFAM (2020) Small group of rich nations have bought up more than half the future supply of leading COVID-19 vaccine contenders, OXFAM International, Consultado el 22/12/20 Disponible en <https://bit.ly/3ooQvKh>
- [30] Deb K (2013) Multi-objective Optimization. *Search Methodologies*, 403-449. DOI:10.1007/978-1-4614-6940-7\_15
- [31] Branke J, Deb K, Dierolf H, Osswald M (2004). Finding Knees in Multi-objective Optimization. *Parallel Problem Solving from Nature - PPSN VIII*, 722–731. DOI:10.1007/978-3-540-30217-9\_73
- [32] Veldhuizen D, Lamont GB (2000) Multiobjective evolutionary algorithms: Analyzing the state-of-the-art. *Evolutionary Computation Journal*, 8(2):125–148, DOI:10.1162/106365600568158
- [33] Munguía-López AC, Sampat AM, Rubio-Castro E, Ponce-Ortega JM, Zavala VM (2019) Fairness-guided design of water distribution networks for agricultural lands. *Computers & Chemical Engineering*, 106547. DOI:10.1016/j.compchemeng.2019.106547
- [34] Sampat AM, Zavala, VM, (2019) Fairness measures for decision-making and conflict resolution. *Optimization and Engineering*, 1–24. Doi:10.1007/s11081-019-09452-3
- [35] Arrow K (1950) A difficulty in the concept of social welfare. *Journal of Political Economy*. 58(4):328-346. DOI:10.1086/256963

- [36] Bellù L, Liberati P (2005) Social welfare analysis of income distributions. Ranking income distributions with Lorenz curve. <http://www.fao.org/3/a-am389e.pdf>  
Consultado el 1 Diciembre 2020
- [37] Chung H (2018) Rawls's Self-Defeat: A Formal Analysis. *Erkenntnis* 85(5):1169-1197. DOI:10.1007/s10670-018-0079-4
- [38] Kaneko M, Nakamura K (1979) The Nash social welfare function, *Econometrica* 47:423-435 DOI:10.2307/1914191
- [39] Cole R, Gkatzelis V (2018) Approximating the Nash social welfare with indivisible items, *SIAM Journal on Computing*. 47(3), 1211–1236. DOI:10.1137/15M1053682
- [40] Streicher-Porte M, Widmer R, Jain S, Bader HP, Scheidegger R, Kytzia S (2005) Key drivers of the e-waste recycling system: Assessing and modelling e-waste processing in the informal sector in Delhi. *Environmental Impact Assessment Review*, 25(5), 472–491. DOI: 10.1016/j.eiar.2005.04.004
- [41] HY Kang, JM Schoenung (2005) Electronic waste recycling: A review of U.S. infrastructure and technology options. *Resources, Conservation and Recycling*. 45(4) 368–400. DOI: 10.1016/j.resconrec.2005.06.0
- [42] Tuncuk A, Stazi V, Akcil A, Yazici AE, Deveci H (2012) Aqueous metal recovery techniques from e-scrap: Hydrometallurgy in recycling. *Minerals Engineering*, 25(1) 28–37. DOI: 10.1016/j.mineng.2011.09.019
- [43] Congcong Y, Jian P, De-qing Z, Zhengqi G, Xiao-Ming L, (2019) Pyrometallurgical recycling of stainless steel pickling sludge: a review. *Journal of Iron and Steel Research International*. 26 547–557. DOI: 10.1007/s42243-019-00278-y.

- [44] Jirang CUI, Roven HJ, Recycling of automotive aluminum (2010) *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 20(11), 2057-2063. DOI: 10.1016/S1003-6326(09)60417-9
- [45] EPSON (2016) The sustainable way to securely destroy and upcycle paper. EPSON. <https://www.epson.eu/paperlab#view-specifications>, (Consultado el 29 Septiembre 2021).
- [46] Rogoff MJ, Gardner RB (2016) High costs and limited markets put a crack in glass recycling. *MSW Management*. <https://www.mswmanagement.com/recycling/article/13023949/high-costs-and-limited-markets-put-a-crack-in-glass-recycling>, (Consultado el 19 de Noviembre 2021).
- [47] Neena G, Kurian T (2014) Recent developments in the chemical recycling of postconsumer poly(ethylene terephthalate) waste. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 53 14185-14198. DOI: 10.1021/IE501995M
- [48] Al-Salem SM, Lettieri P, Baeyens J (2009) Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review. *Waste Management*. 29(10), 2625-2643. DOI: 10.1016/j.wasman.2009.06.004
- [49] Ragaert K, Delva L, Van Geem K (2017) Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. *Waste Management*, 69, 24–58. DOI:10.1016/j.wasman.2017.07.044
- [50] Williams PT (2021) Hydrogen and carbon nanotubes from pyrolysis-catalysis of waste plastics: A review. *Waste Biomass Valor*. 12, 1–28. DOI:10.1007/s12649-020-01054-w

- [51] Ilyas S, Srivastava RR, Kim H (2020) Disinfection technology and strategies for COVID-19 hospital and bio-medical waste management. *Science of The Total Environment*, 749 141652. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.141652
- [52] Wang J, Shen J, Ye D, Yan X, Zhang Y, Yang W, Li X, Wang J, Zhang L, Pan L (2020) Disinfection technology of hospital wastes and wastewater: suggestions for disinfection strategy during coronavirus disease 2019 (COVID-19) pandemic in China. *Environmental Pollution*. 262, 114665. DOI: 10.1016/j.envpol.2020.114665.
- [53] Miccio M, Pierri R, Cuccurullo G, Metallo A, Brachi P (2020) Process intensification of tomato residues drying by microwave heating: experiments and simulation. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 156, 108082. DOI: 10.1016/j.cep.2020.108082
- [54] Huang H, Tang L (2007) Treatment of organic waste using thermal plasma pyrolysis technology. *Energy Conversion and Management*, 48(4), 1331–1337. DOI: 10.1016/j.enconman.2006.08.01
- [55] Liping LV, Zhang Z, Li H (2019) SNG-electricity cogeneration through MSW gasification integrated with a dual chemical looping process. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 145, 107665. DOI: 10.1016/j.cep.2019.107665
- [56] Gómez-Barea A, Vilches LF, Leiva C, Campoy M, Fernández-Pereira C (2009) Plant Optimisation and Ash Recycling in Fluidised Bed Waste Gasification. *Chemical Engineering Journal*. 146, 227-236. DOI: 10.1016/j.cej.2008.05.039
- [57] Lou XF, Nair J (2009) The impact of landfilling and composting on greenhouse gas emissions – A review. *Bioresource Technology*, 100(16), 3792–3798. DOI: 10.1016/j.biortech.2008.12.00

- [58] Sánchez A, Artola A, Font X, Gea T, Barrena R, Gabriel D, Mondini C (2015) Greenhouse gas from organic waste composting: emissions and measurement. *CO<sub>2</sub> Sequestration, Biofuels and Depollution*, 33–70. DOI: 10.1007/978-3-319-11906-9\_2
- [59] Xia W, Jiang Y, Chen X, Zhao R (2021) Application of machine learning algorithms in municipal solid waste management: A mini review. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, 0734242, 1-16. DOI:10.1177/0734242x211033716
- [60] Sanchez-Lengeling B, Aspuru-Guzik A (2018) Inverse molecular design using machine learning: Generative models for matter engineering. *Science*. 361, 360–365. DOI: 10.1126/science.aat2663
- [61] DGE (2020) Covid-19 Mexico. <https://coronavirus.gob.mx/datos/#DOView> Accessed 1 December 2020
- [62] SINAI SCAP (2020) Sistema de información de la secretaria de salud. <http://sinaiscap.salud.gob.mx:8080/DGIS/#> Accessed 1 December 2020
- [63] INEGI (2020) Incidencia delictiva. [https://www.inegi.org.mx/temas/incidencia/#Informacion\\_general](https://www.inegi.org.mx/temas/incidencia/#Informacion_general) Consultado el 1 Diciembre 2020
- [64] Delca (2020) Ultra congelador especificaciones técnicas <https://edition.cnn.com/2020/11/21/world/coronavirus-vaccine-dry-ice-intl/index.html> Consultado el 1 de diciembre 2020
- [65] Expo maquinaria (2020) Congelador Vertical Industrial especificaciones técnicas. <https://www.expomaquinaria.es/congelador-vertical-industrial/7539-congelador-semi-profesional-acabado-inox-efcev350.html> Consultado el 1 de diciembre 2020

- [66] Forbes (2020) How much will a COVID 19 vaccine cost? Disponible en: <https://www.forbes.com/sites/katiejennings/2020/11/17/how-much-will-a-covid-19-vaccine-cost/?sh=3255452576de> Consultado el 1 de diciembre 2020
- [67] Citywaste, Medical Waste Disposal New York. Citywaste. <https://citiwaste.com/new-york>, 2021 (Consultado el 1 Diciembre 2020).
- [68] DSNY, Annual Report: New York City Curbside and Containerized Municipal Refuse and Recycling Statistics. The City of New York Department of Sanitation. [https://dsny.cityofnewyork.us/wp-content/uploads/2020/08/about\\_dsny-collections-annual-2020.pdf](https://dsny.cityofnewyork.us/wp-content/uploads/2020/08/about_dsny-collections-annual-2020.pdf), 2020 (Consultado el 1 Diciembre 2020).
- [69] Themelis NJ, YH Kim, MH Brady (2002) Energy recovery from New York City municipal solid wastes. *Waste Management & Research*. 20(3), 223-233. DOI: 10.1177/0734242X0202000303
- [70] IHME (2021) COVID-19 Projections. Institute for Health Metrics and Evaluation. <https://covid19.healthdata.org/united-states-of-america/new-york?view=cumulative-deaths&tab=trend>, (Consultado el 1 Diciembre 2020).
- [71] NYC (2021) Health, COVID-19: Data. NYC Health. <https://www1.nyc.gov/site/doh/covid/covid-19-data-totals.page>, (Consultado el 29 Septiembre del 2021).
- [72] Liang Y, Song Q, Wu N, Li J, Zhong Y, Zeng W (2021) Repercussions of COVID-19 pandemic on solid waste generation and management strategies. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*. 15(115), 1767, DOI: 10.1007/s11783-021-1407-5



- [73] NYCGOV (2021) Organics Collection. Consultado el 1 Diciembre 2020. Website of the City of New York. <https://www1.nyc.gov/site/sustainability/our-programs/organics-collection.page>
- [74] Forti V, Baldé CP, Kuehr R, Bel G (2020) The Global E-waste Monitor, Disponible en <https://www.itu.int/myitu/-/media/Publications/2020-Publications/EN---Global-E-waste-Monitor-2020.pdf>, 2021 (Consultado el 1 Diciembre 2020).
- [75] Garibay-Rodriguez J, Laguna-Martinez MG, Rico-Ramirez V, Botello-Alvarez JE (2018) Optimal municipal solid waste energy recovery and management: A mathematical programming approach. *Computers & Chemical Engineering*. 19(2), 394-405, DOI: 10.1016/j.compchemeng.2018.09.025
- [76] Leif D (2020) Glass is costing MRFs \$150 million annually. Resource recycling. <https://resource-recycling.com/recycling/2017/04/20/glass-costing-mrfs-150-million-annually/> (Consultado el 1 Octubre 2020).
- [77] WHO (2014) Safe Management of Wastes from Health Care Activities. UNHCR WASH. <https://wash.unhcr.org/download/safe-management-of-wastes-from-health-care-activities-2nd-ed-who/>, (Consultado el 1 Octubre 2020).
- [78] Noble Engineering (2021) Products and services: Hydrometallurgical Process Plant. Noble engineering co. <https://www.indiamart.com/nobleengineering/hydrometallurgical-process-plant.html>, (Consultado el 1 Octubre 2020).
- [79] Tran LH, Tanong K, Jabir AD, Mercier G, Blais JF (2020) Hydrometallurgical process and economic evaluation for recovery of Zinc and

Manganese from spent alkaline batteries. *Metals*. 10(9), 1175. DOI: 10.3390/met10091175

- [80] Haque N, Bruckard WJ, Cuevas J (2012) A techno-economic comparison of pyrometallurgical and hydrometallurgical options for treating high-arsenic copper concentrates. CSIRO Publishing. Disponible en: <https://publications.csiro.au/rpr/download?dsid=DS5&pid=csiro:EP12997> (Consultado el 1 Octubre 2020).
- [81] ASTEC (2021) ABAX STEEL factory. Astec industries. Accessed 29 september 2021. <https://astec-equipment.en.alibaba.com/?spm=a2700.details.cordpanyb.2.57a241b7zkxJAB>, (Consultado el 1 Octubre 2020).
- [82] Holmgren KM (2015) Investment cost estimates for gasification based biofuel production systems. IVL Svenska Miljöinstitutet. Disponible en: <https://www.ivl.se/download/18.7e136029152c7d48c202a1d/1465298345076/B2221.pdf>
- [83] Hamid K, Sabir R, Hameed K, Waheed A, Ansari MU (2021) Economic analysis of fuel oil production from pyrolysis of waste plastic. *Austin Environmental Sciences*. 6(1) 1053. <https://austinpublishinggroup.com/environmental-sciences/download.php?file=fulltext/aes-v6-id1053.pdf>, (Consultado el 1 Octubre 2021).
- [84] ABITARE (2017) DIY papermaking. *ABITARE*. <https://www.abitare.it/en/design-en/products/2017/06/19/espon-paperlab/>, (Consultado el 1 Octubre 2020).

- [85] Taramachines (2021) Waste paper recycling machine. *Tara machines*. <https://www.taramachines.net/waste-paper-recycling-machine.html>, (Consultado el 1 Octubre 2021).
- [86] Braunegg G, Bona R, Schellauf F, Wallner E (2007) Solid waste management and plastic recycling in Austria and Europe, *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 43(6), 1755-1767, DOI: 10.1081/PPT-200040090
- [87] Mani S, Sokhansanj S, Bi X, Turhollow A (2006) Economics of producing fuel pellets from biomass. *Applied Engineering in Agriculture*. 22(3), 421-426. DOI:10.13031/2013.20447
- [88] JWN (2019) Capital Power to build carbon nanotube facility at Genesee, test use in concrete. *JWN energy*. <https://www.jwnenergy.com/article/2019/12/6/capital-power-build-carbon-nanotube-facility-genes/>, (Consultado el 1 Octubre 2021).
- [89] Janes B (2014) Is recycling glass worth the cost? Killeen Daily Herald. [Http://kdhnews.com/news/is-recycling-glass-worth-the-cost/article\\_8e2dd0e6-d956-11e2-ab95-0019bb30f31a.html](http://kdhnews.com/news/is-recycling-glass-worth-the-cost/article_8e2dd0e6-d956-11e2-ab95-0019bb30f31a.html), (Consultado el 1 Octubre 2021).
- [90] CTCN (2010) Gasification of waste. *Climate Technology Center & Network*. <https://www.ctc-n.org/technologies/gasification-waste>, (Consultado el 1 Octubre 2021).
- [91] Chung W, Kim D, Anderson N (2012) Productivity and cost analysis of a mobile pyrolysis system deployed to convert mill residues into biochar. Rocky Mountain Research. Disponible en: [https://www.fs.fed.us/rm/pubs\\_other/rmrs\\_2012\\_chung\\_w002.pdf](https://www.fs.fed.us/rm/pubs_other/rmrs_2012_chung_w002.pdf), (Consultado el 1 Octubre 2021).

- [92] Hanley N, Slark R (1994) Cost-benefit analysis of paper recycling: a case study and some general principles, *Journal of Environmental Planning and Management*, 37:2, 189-197. DOI: 10.1080/09640569408711969
- [93] Husock H (2020) The Declining Case for Municipal Recycling. Manhattan-institute. <https://www.manhattan-institute.org/recycling-cost-benefit-analysis>, (Consultado el 1 Octubre 2021).
- [94] Eriksson G, Athanassiadis D, Bergström D, Nordfjell T, Bergsten U (2012) Production costs and markets for pellet chips: case studies in Northern Sweden, *International Journal of Forestry Research*, 2012, 302014 DOI: 10.1155/2012/302014
- [95] Douglas A, Carter R, Li M, Cary L (2018) Toward small-diameter carbon nanotubes synthesized from captured carbon dioxide: Critical role of catalyst coarsening. *Applied Materials & Interfaces*. 10(22), 19010-19018 DOI: 10.1021/acsami.8b02834
- [96] Fuentes-Cortés LF, Serna-González M, Ponce-Ortega JM (2017) Analysis of carbon policies in the optimal design of domestic cogeneration systems involving biogas consumption. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 5(5), 4429–4442. DOI: 10.1021/acssuschemeng.7b00524
- [97] UMWELT (2020) Electrical and electronic waste. Umwelt Bundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/en/topics/waste-resources/product-stewardship-waste-management/electrical-electronic-waste>, (Consultado el 1 Octubre 2021).
- [98] Young GC (2010) Municipal solid waste to energy conversion processes: economic, technical, and renewable comparisons. John Wiley & Sons. ISBN: 978-0-470-53967-5

- [99] Larouche F, Tedjar F, Amouzegar K, Houlachi G, Bouchard P, Demopoulos GP, Zaghbi K (2020) Progress and status of hydrometallurgical and direct recycling of Li-Ion batteries and beyond. *Materials*. 13, 801. DOI: 10.3390/ma13030801
- [100] Plunkert PA (2000) Aluminum Recycling in the United States in 2000. US Department of the Interior, US Geological Survey, USA. <https://pubs.er.usgs.gov/publication/cir1196W>, 2006 (Consultado el 1 Octubre 2021).
- [101] Sayara T, Basheer-Salimia R, Hawamde F, Sánchez A (2020) Recycling of organic wastes through composting: process performance and compost application in agriculture. *Agronomy*. 10(11) 1838. DOI: 10.3390/agronomy10111838
- [102] EPAORCR (2010) Municipal Solid Waste Generation, Recycling, and Disposal in the United States Tables and Figures for 2010. U.S., USA. <https://www.epa.gov/facts-and-figures-about-materials-waste-and-recycling/national-overview-facts-and-figures-materials#:~:text=The%20total%20generation%20of%20municipal,pounds%20per%20person%20per%20day.&text=Together%2C%20almost%2094%20million%20t ons,percent%20recycling%20and%20composting%20rate.,> 2011 (Consultado el 1 Octubre 2021).
- [103] Alireza B, Gordon M (2012) A review-synthesis of carbon nanotubes from plastic wastes. *Chemical Engineering Journal*. 195–196, 377–391. DOI: 10.1016/j.cej.2012.03.077
- [104] Hur T, Lim S, Lee H (2003) A study on the eco-efficiencies for recycling methods of plastics wastes. *International Life Cycle Assessment and Management Conference*, 22. <https://p2infohouse.org/ref/37/36326.pdf>, 2003 (Consultado el 1 Octubre 2021).

- [105] Ramnarain YI, Ansari AA, Ori L (2019) Vermicomposting of different organic materials using the epigeic earthworm *Eisenia foetida*. *International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture*. 8, 23–36. DOI: 10.1007/s40093-018-0225-7
- [106] NCDOR (2021) Solid Waste Disposal Tax. North Carolina Department of Revenue. <https://www.ncdor.gov/taxes-forms/other-taxes-and-fees/solid-waste-disposal-tax>, (Consultado el 1 Octubre 2021).
- [107] Kannangara M, Dua R, Ahmadi L, Bensebaa F (2018) Modeling and prediction of regional municipal solid waste generation and diversion in Canada using machine learning approaches. *Waste Management*, 74, 3–15. DOI:10.1016/j.wasman.2017.11.057
- [108] Briefing Booklet (2006) New York City Population Projections by Age/Sex & Borough, 2000–2030. Disponible en: [https://www1.nyc.gov/assets/planning/download/pdf/planning-level/nyc-population/projections\\_briefing\\_booklet.pdf](https://www1.nyc.gov/assets/planning/download/pdf/planning-level/nyc-population/projections_briefing_booklet.pdf) (Consultado el 1 Marzo 2022)
- [109] Statista (2021) Median household income in New York from 1990 to 2020, <https://www.statista.com/statistics/205974/median-household-income-in-new-york/> (Consultado el 1 Marzo 2022)
- [110] Zhang L, Li D, Ren L (2020) COVID-19 propagation analysis of a multistage dynamic time lag dynamics model. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*. 45, 658–666. DOI: 10.13203/j.whugis20200206
- [111] NCY Open Data (2022) DSNY Monthly Tonnage Data, <https://data.cityofnewyork.us/City-Government/DSNY-Monthly-Tonnage-Data/ebb7-mvp5> (Consultado el 1 Marzo 2022)
- [112] Janagi R, Shah J, Maheshwari D (2015) Scenario of management of medical waste in us and uk: a review, *Journal of Global Trends in Pharmaceutical Sciences*.

- 6(1) 2328–2339. <https://www.jgtps.com/admin/uploads/ERmDV8.pdf>, (Consultado el 1 Octubre 2021).
- [113] Mei X, Hao X, Sun Y, Wang X, Zhou Y (2021) Optimization of medical waste recycling network considering disposal capacity bottlenecks under a novel coronavirus pneumonia outbreak. *Environmental Science and Pollution Research*. DOI: 10.1007/s11356-021-16027-2
- [114] Roy P, Mohanty AK, Wagner A, Sharif S, Khalil H, Misra (2021) Impacts of COVID-19 Outbreak on the municipal solid waste management: now and beyond the pandemic. *ACS Environmental*. 1, 32-45 DOI:10.1021/acsenvironau.1c00005
- [115] Zhao N, You F (2021) Food-energy-water-waste nexus systems optimization for New York State under the COVID-19 pandemic to alleviate health and environmental concerns. *Applied Energy*, 282, 116181. DOI:10.1016/j.apenergy.2020.11618
- [116] WNR (2015) New Waterless Paper Recycling Technology. The Water Network. <https://thewaternetwork.com/article-FfV/new-waterless-paper-recycling-technology-lIbnktHl35s50iRrPLLvUg>, (Consultado el 1 Octubre 2021).
- [117] Celis JE, Espejo W, Paredes-Osses W, Contreras SA, Chiang G, Bahamonde P (2021) Plastic residues produced with confirmatory testing for COVID-19: Classification, quantification, fate, and impacts on human health. *Science of The Total Environment*, 760, 144167. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.1441

## **Apéndice A**

En este Apéndice se presentan las portadas de las contribuciones a la investigación.





## Optimal waste management during the COVID-19 pandemic

Aurora del Carmen Munguía-López\*, Rogelio Ochoa-Barragán, José María Ponce-Ortega

Chemical Engineering Department, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Francisco J. Mujica S/N, Ciudad Universitaria, Morelia, Michoacán 58060, México

### ARTICLE INFO

#### Keywords:

Municipal solid waste management  
Optimization  
Process intensification  
Taxation  
COVID-19

### ABSTRACT

There have been many problems generated by the COVID-19 pandemic. One of them is the worrying increase in the generation of medical waste due to the great risk they represent for health. Therefore, this work proposes a mathematical model for optimal solid waste management, proposing a circular value chain where all types of waste are treated in an intensified industrial park. The model selects the processing technologies and their production capacity. The problem was formulated as a mixed-integer linear programming problem to maximize profits and the waste processed, minimizing environmental impact. The proposed strategy is applied to the case study of the city of New York, where the increase in the generation of medical waste has been very significant. To promote recycling, different tax rates are proposed, depending on the amount of waste sent to the landfill. The results are presented on a Pareto curve showing the trade-off between profits and processed waste. We observed that the taxes promote recycling, even of those wastes that are not very convenient to recycle (from an economic point of view), favoring profits, reducing the environmental impact, and the risk to health inherent to the medical waste.

### Nomenclature

#### Binary variables

$h_{i,k}$  binary decision variable for which type of technology  $k$  to use for subtype of waste  $j$   
 $h^{Landfill}$  binary decision variable for what tax rate to use for waste sent to landfill

#### Variables

$AS$  sales associated with agriculture  
 $cost_{j,k}$  costs for the implementation of technology  $k$  for subtype of waste  $j$   
 $cw_{ij}$  subwaste classified  
 $ES$  sales associated with energy production  
 $f_{j,k}$  classified subtype of waste  $j$  that will be processed by technology  $k$   
 $MS$  sales associated with the processed materials  
 $P_{j,k}$  product obtained from the subtype of waste  $j$  using technology  $k$   
 $PTC$  transportation cost for products

$RMTC$  raw material transport cost  
 $T_i$  classified waste  $i$   
 $T^{Landfill}$  amount of total waste sent to landfill  
 $T^{landL}$  waste that will be taxed with a lower penalization  
 $T^{landH}$  waste that will be taxed with a higher penalization.  
 $T^{ll}$  lower bound for the lower tax  
 $T^{lll}$  upper bound for the higher tax  
 $Taxes^L$  taxes with the lower tax rate  
 $Taxes^H$  taxes with the higher tax rate  
 $TC$  total cost  
 $wf$  fraction of the total waste sent to processing

#### Parameters

$A_{j,k}$  fixed cost for using technology  $k$  for subtype of waste  $j$   
 $B_{j,k}$  variable cost for using technology  $k$  for subtype of waste  $j$   
EMPT sales per ton associated with electronic material  
 $k_f$  annualization factor  
 $SC_i$  separation cost  
TCPTR total cost per ton of waste transported  
 $\alpha_i$  existing fraction of each waste  $i$  classified

\* Correspondence author.

E-mail address: [1723704c@umich.mx](mailto:1723704c@umich.mx) (A.d.C. Munguía-López).

<https://doi.org/10.1016/j.cep.2022.108942>

Received 5 December 2021; Received in revised form 13 March 2022; Accepted 18 April 2022  
0255-2701/© 20XX



# Use of Mathematical Approaches for Addressing COVID-19 Pandemic — a Critical Review

Rogelio Ochoa-Barragán<sup>1</sup> · Aurora del Carmen Munguía-López<sup>1</sup> · José María Ponce-Ortega<sup>1</sup>

Received: 14 April 2021 / Revised: 22 June 2021 / Accepted: 11 July 2021  
© The Author(s), under exclusive licence to Springer Nature Singapore Pte Ltd. 2021

## Abstract

The COVID-19 pandemic has caused crises in all fields in which the human race develops. This manuscript reviews various strategies and models developed to deal with the effects of the COVID-19 pandemic generated in different areas, such as vaccine logistics, energy consumption, environmental impact, economic impact, and the management of medical resources. Through this review, it can be observed how the proposed strategies can be compatible with each other and can lead to a greater benefit if they are used together. Some of them are designed to obtain short-term benefits (such as vaccine logistics), while the others are considered long-term benefits (such as economic stabilization). The main objective of this work is to show the reader strategies already established to combat the effects produced by the pandemic that can serve as a guide for the development of new and more robust strategies to achieve greater benefits.

**Keywords** COVID-19 · Pandemic · Mathematical models · Process systems engineering

## Introduction

The world has witnessed multiple pandemics throughout its history; we are currently facing the one generated by the COVID-19 which has caused a radical change in the lifestyle of people around the world (Saadat et al. 2020). Despite technological advances in the medical area, it has been impossible to prevent a worldwide spread of the virus, as well as a high degree of mortality, taking us by surprise due to the great lack of foresight in health management (Inkster et al. 2020). What really matters are the decisions to be made from now on, since the current pandemic has generated not only health problems, but also problems of different types such as environmental problems due to a fairly significant increase in sanitary waste, and a large increase in the consumption of plastics (Patrício-Silva et al. 2021).

The economic impact related to the pandemic has been affected mainly by the decrease in industrial production capacity, which also causes problems in the distribution of food and medical supplies (it directly affects the supply

chain) and by the financial impact on the market and companies (Guan et al. 2020).

From a kinder point of view, we can affirm that the response to the global pandemic has generated extensive advances in various areas. One of the most notable is the impressive improvement in vaccine development. Previously, vaccines took more than 10 years to develop, while the vaccine for COVID 19 was developed in a record time of less than a year (for vaccines such as those developed by Pfizer, Moderna, Gamaleya, and AstraZeneca) (Silveira et al. 2021). Another undeniable great advance is the development of digital technologies, which has played a fundamental role in preserving the economy and education by creating teleworking systems and mobile platforms that make it possible to work from anywhere (Dwivedi et al. 2020). However, these benefits are not observable throughout the world, since in developing countries, there is a high level of deficiencies at a technological level. Here, it has not been possible to observe these benefits for people in unfavorable economic conditions or in rural areas. Therefore, teleworking becomes a luxury that only certain people can reach in developing countries (Kanellopoulos 2011). In addition, there is a psychological discomfort associated with the educational level and the workload that can affect the population depending on their lifestyle and habits (De Sio et al. 2021).

✉ José María Ponce-Ortega  
jose.ponce@umich.mx

<sup>1</sup> Chemical Engineering Department, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Francisco J. Mujica S/N, Ciudad Universitaria, 58060 Morelia, Michoacán, México

## Apéndice B

En este Apéndice se muestra un link con los ejemplos de códigos para cada una de las estrategias presentadas en este trabajo.

[https://drive.google.com/drive/folders/1ffIkZe1RCFGNnbB\\_RZI2NI55IVojTw-a?usp=sharing](https://drive.google.com/drive/folders/1ffIkZe1RCFGNnbB_RZI2NI55IVojTw-a?usp=sharing)