



**ARTÍCULO ORIGINAL
LOGÍSTICA**

Diseño de la cadena logística inversa para modelo de negocio de economía circular

Design of a reverse logistics chain for a circular economy business model

Juan Valenzuela-Inostroza, Andrea Espinoza-Pérez, Miguel Alfaro-Marchant

Universidad de Santiago de Chile, Chile

Correo electrónico: juan.valenzuela.i@usach.cl, andrea.espinozap@usach.cl,
miguel.alfaro@usach.cl

Recibido: 10 de julio del 2019.

Aprobado: 26 de agosto del 2019.

RESUMEN

Se muestra un diseño de una red de logística inversa para plásticos contaminados con petróleo; la que, busca minimizar los costos y hacerla más atractiva financieramente, para el reciclaje. Esta disminución de costos se logra a partir de la selección en la ubicación de instalaciones para el procesamiento del plástico y la cantidad de plantas reprocesadoras a instalar. Se busca minimizar los costos del transporte, y, maximizar las utilidades de la venta de la materia prima generada, para el beneficio de los distintos *stakeholders*. El modelo fue capaz de seleccionar qué plantas de reproceso se deberían instalar, pudiendo, a su vez, evidenciar algunas falencias, en cuanto a la determinación de variables y posibles futuras investigaciones. El modelo fue trabajado con programación lineal y resuelto con algoritmos evolutivos, lo que permitió encontrar soluciones en un Frente de Pareto, que permiten deducir las distintas combinatorias de las variables de decisión, para ser aplicadas en la cadena logística.

Palabras clave: logística inversa, economía circular, plásticos contaminados, algoritmos evolutivos; reciclaje.

ABSTRACT

This work shows a design of a reverse logistics network for petroleum-contaminated plastics; which seeks to minimize costs and make it more financially attractive, for recycling. This cost reduction is achieved by selecting plastic processing facilities at the location and the number of reprocessing plants to be installed. In addition, together, it seeks to minimize transport costs, and to maximize the profits from the sale of the generated raw material, for the benefit of the different stakeholders. The model was able to select which reprocessing plants should be installed, and may, in turn, show some shortcomings, in terms of the determination of variables and possible future research. The model was worked with linear programming and solved with evolutionary algorithms, which allowed to find solutions in a Pareto Front, which allow to deduce the different combinatorials of the decision variables, to be applied in the logistics chain.

Key words: reverse logistics, circular economy, contaminated plastics, evolutionary algorithms; recycling.

I. INTRODUCCIÓN

Los desechos se han transformado en un problema mundial, con escasos atisbos de soluciones. "Los municipios de todo el mundo están bajo presión para desviar los residuos sólidos urbanos (MSW) de los vertederos, involucrando una rápida escalada de los costos. En los Estados Unidos,

DISEÑO DE LA CADENA LOGÍSTICA INVERSA PARA MODELO DE NEGOCIO DE ECONOMÍA CIRCULAR

los MSW han aumentado en un 285% de 1960 a 2006, de los cuales los plásticos han tenido la mayor tasa de crecimiento, del 7562%"(Chari, Venkatadri Diallo, 2016: 7). En la figura 1, se puede observar el porcentaje de países en desarrollo sin un acceso mínimo de gestión de residuos (Mavropoulos, 2015). Es evidente que África Subsahariana y el Sur de Asia están con altísimos niveles de falta de gestión de residuos (sobre el 85%).

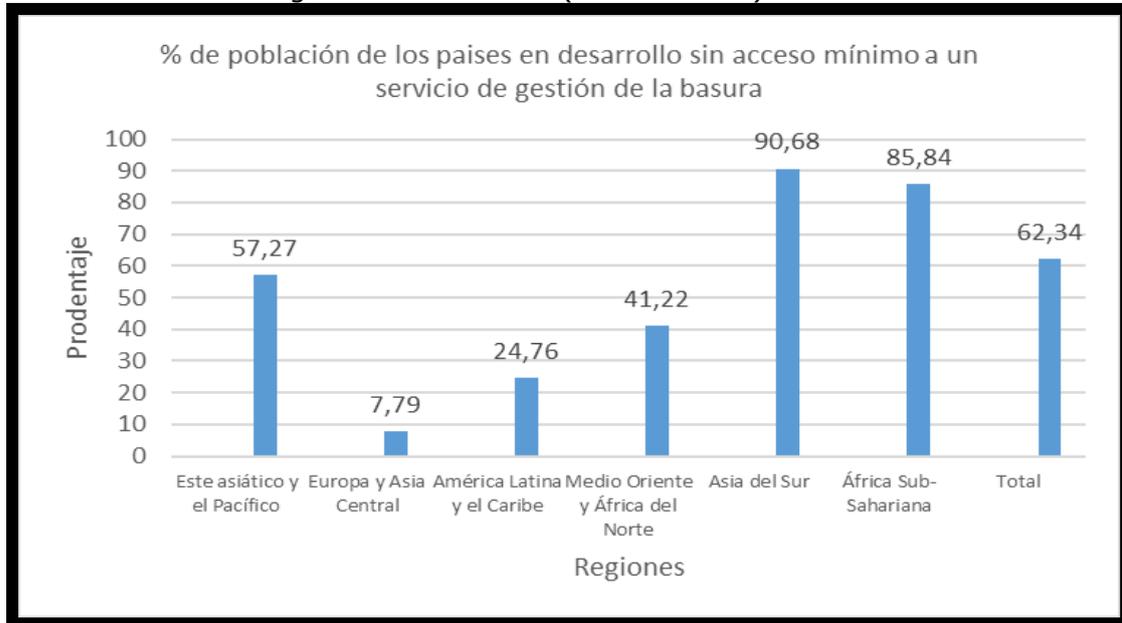


Fig. 1. Porcentaje de la población de los países en desarrollo sin acceso a la recolección periódica de desechos (United Nations Environment Programme, 2015).

Los países, además de tener el problema de no contar con servicios mínimos para la gestión de residuos, tienen un manejo ineficiente de la basura, una alta incidencia de contaminación en las poblaciones que rodean a los vertederos, gran acumulación de basura y el desarrollo de prácticas informales de gestión. Como advierte el programa de las Naciones Unidas para el medio ambiente, los emplazamientos (estudiados) de depósitos se encuentran en promedio a 5 km de la población civil. Tienen una superficie de 24 hectáreas, una duración media de 17 años, y almacenan una cantidad de 2,5 millones de toneladas de basura, como se presenta en la Figura 2.



Fig. 2. Distancia media de poblaciones a grandes vertederos (programa de las Naciones Unidas para el medio ambiente, 2015).

El uso de los plásticos, como señaló Chari, Venkatadri&Diallo en su investigación, ha aumentado en un 7562% en los últimos 40 años. El plástico es considerado un residuo peligroso por especialistas académicos, esencialmente debido al daño causado al ser potencialmente tóxicos (Chelsea, y otros, 2018). Producto de lo anterior, es necesario generar acciones que disminuyan la contaminación por desechos provenientes del plástico, en detrimento del medio ambiente. Según la figura 3, podemos notar que el plástico es el componente con mayor presencia en los desechos que no son residuos orgánicos (Hoornweg, D; Bhada P. 2015). Los plásticos, entonces, al mismo tiempo son potencialmente perjudiciales y representan un alto porcentaje de los

J. VALENZUELA-INOSTROZA, A. ESPINOZA-PÉREZ, M. ALFARO-MARCHANT

desechos generados en todo el mundo, como se muestra en la figura 3. DelilahLithner, en su tesis doctoral, demuestra la toxicidad de los productos plásticos, en diferentes escenarios (Lithner, Delilah. 2011).

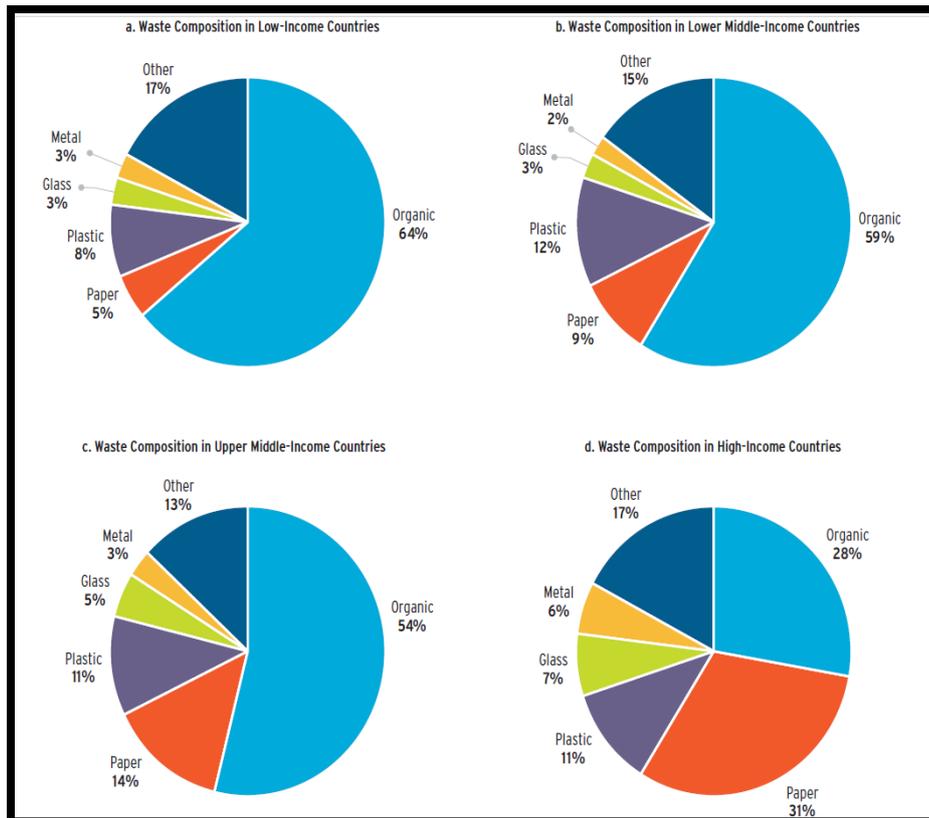


Fig. 3: Composición de los desechos, según tipo de desecho (Hoornweg, D; Bhada, P. 2012)

En este artículo, los investigadores plantean la importancia del reciclaje, al estudiar la generación de dióxido de carbono asociado a la cadena logística del plástico, y como impacta esta generación. El reciclaje en sí es una solución, pero tiene que ir aparejada de un sistema que permita también reinsertar el plástico en desuso a los procesos productivos.

La economía circular se ha presentado como una respuesta, a la irrupción de la industria ecológica y al desarrollo de nuevos modelos de negocios sustentables. Es así, como el año 1996, solo se hablaba de economía circular, bajo las siguientes consideraciones:

"La ecología industrial y de manera similar, las cadenas de suministro de lazo cerrado, se han centrado predominantemente en sus ángulos técnicos y de ingeniería, más que en las implicaciones para su desarrollo desde una perspectiva empresarial" (De Angelis, 2018). Solamente, era considerada como una actividad ligada a la ingeniería, más que un modelo de negocio en sí misma.

Luego de esta declaración, y con el correr de los años, se pueden evidenciar los siguientes ejemplos de economía circular (De Angelis, 2018):

1. Uso de residuos en el proceso de producción (biocombustible) (British Sugar)
2. Remanufactura de Caterpillar, reparación, actualización
3. El mantenimiento de Michelin (recoge de nuevo los neumáticos) y reprocesado

En los ejemplos anteriores, la economía circular ya estaba siendo considerada como un proceso productivo independiente. Para entonces, la Dra. De Angelis, investigadora de la Escuela de Negocios de la Universidad de Exeter y autora de distintas publicaciones relacionadas con Economía Circular, construye una definición de Economía circular como "El enfoque CE también es diferente para su función catalítica potencial, habiendo creado un espacio conversacional. Donde la discusión y las mejores prácticas sobre la eficiencia de los recursos se encuentran y, además, porque estimula a las empresas a "hacer el bien" en lugar de "hacer menos mal" con las prácticas comerciales que son "restauradoras" y "regenerativas". (De Angelis, 2018).

DISEÑO DE LA CADENA LOGÍSTICA INVERSA PARA MODELO DE NEGOCIO DE ECONOMÍA CIRCULAR

En el 2017 la definición de CE es complementada como "un sistema regenerativo en el que la entrada de recursos y los desechos, emisiones y fugas de energía se minimizan, al reducir, cerrar y estrechar los bucles de materiales y energía. Esto se puede lograr a través de un diseño, mantenimiento, reparación, reutilización, remanufactura, renovación y reciclaje duraderos " (De Angelis, 2018). Luego, el 2018, presenta, De Angelis, esta última definición de economía circular: CE como "un sistema industrial que es restaurador o regenerativo por intención y diseño sustituye al concepto de fin de vida con restauración, desplazamientos hacia el uso de energías renovables. Elimina el uso de productos químicos tóxicos, que perjudica la reutilización y apunta a la eliminación de residuos a través del diseño superior de materiales, productos, sistemas, y dentro de este, modelos de negocio " (De Angelis, 2018).

La economía circular, entonces, bajo el paraguas de poder restaurar los productos después del término de su vida útil, se ha convertido en un sistema industrial. Donde se pueden eliminar desechos, pero que se centra en combinar esta eliminación con el diseño de nuevos materiales, productos y sistemas, que permitan concebir un nuevo modelo de negocio.

Un eje principal de la economía circular es la logística inversa. Reducir, Reusar y Reciclar eran los conceptos conocidos, basados en las 3 R del ciclo de vida económico, a los que se agregaron 3 conceptos más. Estos integran la definición de economía circular, a través de: recuperar los materiales, remanufacturar los productos, y rediseñar las tecnologías. La logística inversa estudia sistemas de manufactura/remanufactura, transporte, bodegaje, y recuperación del inventario (Turki, Sauvey, &Rezg, 2018). Esta permite recuperar parte del material que ha sido utilizado en procesos productivos, y, que ha sido entregado por el usuario final para su desecho. Involucra el no agotamiento de los recursos, evitar que el residuo peligroso sea eliminado al medioambiente, no contaminándolo, y también, extendiendo el ciclo de vida del producto. Algunas variables por considerar dentro de la logística inversa son los costos de manufacturar/remanufacturar, costos de almacenamiento, costos de transporte y emisiones de contaminantes en el transporte (Turki, Sauvey, &Rezg, 2018). Otras investigaciones han coincidido en que la logística inversa permite que "cada fabricante individual pueda decidir su beneficio, maximizando su propia estrategia, como remanufacturar, o rescatar materiales claves para usar en sus propias operaciones de producción, lo que podría facilitar el abastecimiento de materiales críticos. Promover sistemas mejorados de logística inversa puede proporcionar una ventaja competitiva a las empresas y ayudar a administrar los productos devueltos al final de su vida útil" (Gaustada, Krystofika, Bustamante, &Badamia, 2018).

La transformación de los modelos de negocios, donde el énfasis no es singularmente en economía o en aspectos ambientales y sociales, sino que es en el "*Triple-Bottom-Line*", o la combinación de la economía, el medio ambiente, y la sociedad en uno solo (Bradley, Jawahir, Badurdeen, &Rouch, 2018). Esto permite mitigar el daño ambiental producido por los procesos industriales llevados a cabo. La logística en reversa tiene como función principal, recuperar los materiales, remanufacturar los productos, y rediseñar las tecnologías, siendo "un término genérico para una serie de modelos, todos los cuales están diseñados para llevar a cabo cinco procesos clave:

- 1) adquisición de producto, que se refiere a la obtención del producto usado por parte del usuario
- 2) logística inversa o restauración, el proceso que permite las opciones económicamente más atractivas (por ejemplo, reutilización directa, reparación, refabricación, reciclado o eliminación)
- 3) inspección y disposición, reciclaje y la evaluación de la condición de retorno para tomar la decisión más rentable para la reutilización mediante la reducción del producto a sus elementos básicos
- 4) remanufactura, devolviendo el producto a las especificaciones originales
- 5) comercialización o reventa, que se refiere a crear mercados secundarios para el producto recuperado y remarketearlos, para crear y explotar mercados para restauración y distribución de ellos (Chartered Institute of Procurement & Supply, 2018)

El modelo que a continuación se presenta, está basado en la investigación realizada por Feitó y Crespón el 2017. Ellos trabajan un rediseño de una cadena logística de plástico en Cuba. En ese país, las operaciones de logística inversa son manejadas por el estado a través de una empresa para la recuperación de materia prima. El modelo diseñado está pensado para optimizar una cadena logística basada en un modelo de economía circular, para aumentar los beneficios de esta cadena, en una empresa relacionada con la industria del plástico.

El artículo está estructurado de la siguiente manera: en la sección 2, se revisará la literatura a través de la búsqueda de modelos basados en logística inversa en los últimos 5 años. La formulación matemática del modelo a proponer será tratada en la sección 3. En la sección 4 será explicada la proposición de solución. Finalmente, en la sección 5 se presentarán las conclusiones.

Revisión bibliográfica

La revisión bibliográfica sólo se referirá a explicar los textos estudiados si tienen logística inversa y, además, corresponden a modelos de programación lineal. Lo anterior, como una forma de identificar la importancia de la logística inversa y los modelos de programación lineal, diseñados para su estudio e implementación, y cuya investigación se está llevando a cabo en el último tiempo. Estas investigaciones abarcan un período cronológico de 5 años, desde el año 2014 al 2018.

El primer paso de la investigación se refiere a lo que ya se ha explicado. ¿Por qué decidir hacer esta investigación? Debido a la necesidad de encontrar la utilidad para los estanques de plástico contaminados con combustible. Entonces, este primer paso es identificar una línea de investigación que ayude a esa tarea, y así es, como la logística inversa, se presenta como un área capaz de concretizar este objetivo (ya observado en la introducción) y la economía circular. Para este punto, se identificaron las investigaciones que, dentro de su estudio, consideraban la logística inversa como parte de su temática de interés.

Un segundo paso, fue identificar las palabras claves. Esto se realizó, principalmente, para identificar las investigaciones similares a la que se está llevando a cabo. Así, las palabras clave fueron: logística inversa y plástico.

Un tercer paso fue identificar los otros elementos de estudio. En este caso, sólo se considerará si son parte de investigaciones relacionadas con la logística inversa y, si tienen en su investigación, o proponen en su investigación, modelos de programación lineal.

Las investigaciones seleccionadas como exitosas, entregan información precisa en cuanto a la relevancia de la logística inversa y los modelos matemáticos, aportando así, datos concluyentes. Feitó, Sarache, Piedra y Crespón (2017) demuestran que las redes logísticas mejoran los rendimientos de sostenibilidad. Senthil, Murugaanthan y Ramesh (2018) orientan su investigación en los riesgos de las cadenas logísticas. Ellos evidencian que el control de inventario es primordial, y tienen un significativo impacto en el gerenciamiento de las cadenas. De la Hoz, Velez y López (2017) por su parte, plantean que, su modelo, otorga un mejoramiento del 12,6% en los costos asociados al programa de planeación. Mahdi y Olfati (2018) muestran que los resultados obtenidos con el modelo propuesto confirman que este es eficiente y aplicable.

Durante el registro de los elementos que se buscaban en el proceso de investigación, fue sorprendente ver que los investigadores, no consideraban el papel gubernamental en a la implementación de las soluciones logísticas. Si bien, en una investigación realizada en Nueva Escocia (Chari, N; Venkatadri, U; Diallo, C. 2016) se puede observar la participación de instituciones públicas, en el resto de las investigaciones no pudo ser evidenciada ni analizada esta realidad. Sin embargo, hay una investigación que plantea un modelo bastante atractivo, para poder evaluar la participación de entes públicos. Wang, HY; Li, J; Li, Y; Chen, GQ el año 2018 investigan cuales debiesen ser los esfuerzos gubernamentales para poder incentivar a las empresas a desarrollar cadenas logísticas eficientes medioambientalmente. Esta investigación plantea, a través del estudio de ciencias del comportamiento, resultados que permiten crear escenarios de solución a la problemática del encareciendo de los procesos, cuando tienden a ser más amigables medioambientalmente.

II. MÉTODOS

La representación matemática del modelo es presentada en este acápite. Para tal efecto, lo primero será señalar de que se trata el problema a investigar. Un segundo punto será la definición de variables y restricciones, y el tercer punto considera la formulación de las ecuaciones.

Para enfrentar el presente modelo, se aplicará una solución al problema mediante optimización multiobjetivo.

La empresa estudiada, vende a sus clientes, estanques plásticos, que están siendo utilizados para almacenar diésel; y que se encuentran ubicados en distintas zonas del país. Se venden alrededor de 1600 estanques al año, que, en promedio, generan 252 ton de plástico. Los estanques mencionados, tienen una vida útil de 5 a 20 años aproximadamente y; en la actualidad, una vez que se dejan de utilizar los estanques, están yendo directamente al vertedero municipal. Este nuevo modelo de negocios pretende recuperar los estanques plásticos y transformarlos en materia prima para el mismo fin u otros.

Inicialmente, se deben retirar los estanques desde las instalaciones de combustible donde están dispuestos. Después de esto, deben ser llevados a algún centro (está será la primera incógnita), ya que se deberán desamblar de todos los periféricos (otros elementos que ayudan a la

DISEÑO DE LA CADENA LOGÍSTICA INVERSA PARA MODELO DE NEGOCIO DE ECONOMÍA CIRCULAR

manipulación del líquido almacenado y que no son parte del proceso de reciclaje), y, en algunos casos, de sus piscinas de contención.

Una vez despojados de sus periféricos, los que serán devueltos a la empresa, para su disposición final o recuperación, los estanques plásticos (sucios y contaminados), serán llevados a la planta de remanufacturación.

En la planta de remanufacturación, estos estanques deben ser triturados, y no sabemos, si antes de esto, deben ser lavados o no. Para este modelo y caso de estudio, los estanques **no se lavarán**. Después de esto, y una vez obtenida la materia prima, debe ser llevada al puerto de San Antonio o Talcahuano, para su embarque a China o Europa. Se eligen estos destinos ya que, la procedencia de los estanques plásticos es desde Europa, y China, lleva tiempo recibiendo plástico reciclado.

Interrogantes:

No sabemos la cantidad de centros de recolección

No sabemos la cantidad de centros de remanufacturación

Sabemos que la cantidad de estanques producida es de 1600 unidades por año, equivalente a 252 toneladas como promedio

A continuación, se presenta la gráfica del modelo, dónde la w es el proveedor del estanque de combustible, c es el centro de recolección, dónde se separa el estanque de todos sus componentes periféricos. r es el centro de remanufacturación, dónde los equipos son procesados, conforme al proceso de reciclaje que se elegirá. Como última estación, s es el cliente final, que en este punto es el puerto donde se destinará la carga resultante del proceso de reciclaje.

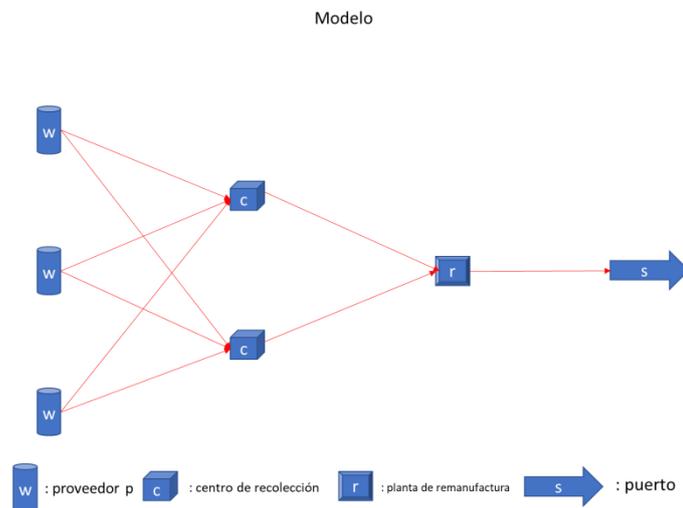


Fig. 4. Representación del modelo matemático

Una vez que el modelo está diseñado conceptualmente, es necesario presentar los diferentes parámetros y variables consideradas en el artículo:

A_p es la cantidad de producto p generada por el proveedor w en ton/año.

C_{tp} es la capacidad del modo de transporte m para mover el producto p en tonelada/envío. C_c

Capacidad del centro de recolección c para desmontar el producto p ton/año.

C_r es la capacidad de la planta de remanufactura r para producir la materia prima en su de p en ton/año.

Q_{st} es la cantidad de envíos disponibles para cada transporte en número de envíos. D_{w-c} es la distancia entre el proveedor w y el centro de recolección c en km.

D_{c-r} Distancia entre el centro de recolección c y la planta de remanufactura r en km.

D_{r-s} es la distancia entre la planta de reciclaje r y el puerto s en km. PC_{rw} es el costo de producción de la materia prima rw (costo total de la operación) en la planta de remanufactura r en \$/año.

PS_{rw} precio de venta de la materia prima. VC_t es el costo variable de transporte en \$/ton-km. FC_r es el costo fijo de usar una planta de remanufactura r en \$/año.

FC_c es el costo fijo de usar un transporte en \$/envío. FC_t es el costo fijo de usar un transporte en \$/envío.

Variables de decisión

J. VALENZUELA-INOSTROZA, A. ESPINOZA-PÉREZ, M. ALFARO-MARCHANT

A_{pmw-c} es la cantidad de producto p transportado en el modo de transporte m entre el proveedor w y el centro de recolección c en tonelada.

A_{pmc-r} es la cantidad de producto p transportado en el modo de transporte m entre el centro de recolección c y la planta de remanufactura r en tonelada.

A_{pmr-s} es la cantidad de producto p transportado en el modo de transporte m entre la planta de remanufactura r y el cliente s en tonelada.

Q_{tw-c} es la cantidad de viajes entre el proveedor w y el centro de recolección c utilizando el transporte m en envíos.

Q_{tc-r} es la cantidad de viajes entre el centro de recolección c y la planta de remanufactura r utilizando el transporte m en envíos.

Q_{tr-s} es la cantidad de viajes entre la planta de remanufactura r y el cliente s utilizando el transporte m en envíos.

V_r es la variable binaria; 1 si se utiliza la planta remanufacturadora r, 0 en caso contrario en $[0,1]$.

V_c es la instalación del centro de recolección. Q_{bt} Cantidad de viajes por camión.

Por último, el modelo matemático diseñado para representar la cadena logística inversa se presenta mediante las ecuaciones 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7:

$$\sum_w \sum_m A_{pmw-c} = \sum_m A_{pmc-r} \forall_c \tag{1}$$

$$\sum_c A_{pmc-r} = \sum_s A_{pmr-s} \forall_k \tag{2}$$

$$\sum_m \sum_r A_{pmr-s} \leq 10 < dda < 252 \forall_{p,s} \tag{3}$$

$$\sum_m \sum_w \sum_p A_{pmw-c} \leq C_c * V_c \forall_c \tag{4}$$

$$\sum_m \sum_c \sum_p A_{pmc-r} \leq C_r * V_r \forall_r \tag{5}$$

$$\sum_w \sum_c A_{pmw-c} \leq m * pot_m \forall_{m,c} \tag{6}$$

$$A_{p1} \leq 20,16; A_{p2} \leq 25,2; A_{p3} \leq 35,28; A_{p4} \leq 22,68; A_{p5} \leq 17,64; A_{p6} \leq 75,6; A_{p7} \leq 25,2; A_{p8} \leq 17,64; A_{p9} \leq 12,6 \tag{7}$$

- (1) Representa todo el material entregado para el proveedor de plástico contaminado.
- (2) Representa que las cantidades de material entregadas por el proveedor de plástico contaminado deben ser la misma cantidad que sale del centro de recolección.
- (3) Es el balance que toda la cantidad que ingresa a los centros de remanufactura de plástico contaminado es la misma cantidad de plástico que sale de estos para ser vendido a s.
- (4) Cantidad (en porcentaje) de plástico a vender en s1 o s2.
- (5) y (6) representa las capacidades de los centros de recolección y remanufactura.
- (7) Las cantidades que se transportarán son menores o iguales a la posible carga de los dos modos de transporte.

Función objetivo representada por la ecuación 8 y 9:

$$FOBJ1 = [A_{pm1r1-s1} * P_p] - [\{C_m * A_{p,m,w-c} * D_{w-c}\} + \{C_m * A_{p,m,c-r} * D_{c-r}\} + \{C_m * A_{p,m,r-s} * D_{r-s}\}] - [\{FC_r * A_{p,m,r-s}\} + \{FC_c * A_{p,m,r-s}\}] \tag{8}$$

$$FOBJ2 = \sum_m \sum_p C_m * [A_{p,m,w-c} * D_{w-c} + A_{p,m,c-r} * D_{c-r} + A_{p,m,r-s} * D_{r-s}] + \left[\sum_m \sum_p A_{p,m,w-c} + A_{p,m,c-r} + A_{p,m,r-s} \right] * Q_{bt} \tag{9}$$

En la función del objetivo 1, (8) debo maximizar la utilidad en términos del número de unidades que se venderán a nuestro cliente. En la función objetivo 2, (9) debo minimizar el costo del transporte.

III. RESULTADOS

Para este propósito, se programó un algoritmo evolutivo y se utilizó un computador portátil de las siguientes características:

DISEÑO DE LA CADENA LOGÍSTICA INVERSA PARA MODELO DE NEGOCIO DE ECONOMÍA CIRCULAR

Procesador Intel (R) Core (TM) i5-820U CPU@ 1.60GHz 1.80 GHz, RAM instalada 8 GB, Sistema operativo de 64 bits, procesador basado en x64, que generó la siguiente solución:

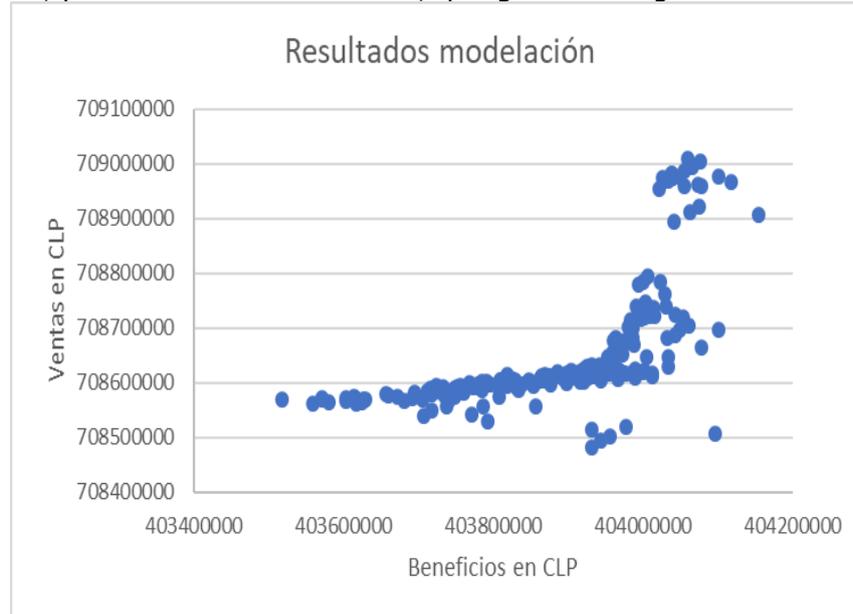


Fig. 6. Resultados en millones de pesos chilenos (CLP)

En la solución presentada, se puede observar un frente de Pareto. La propia evolución del algoritmo permitió poder obtener un resultado más representativo y con una solución más evidente, gráficamente. Existe una vasta concentración en distintas ubicaciones del frente, pero, principalmente en el superior derecho como en el centro del gráfico. Esto nos permite concluir que existen soluciones para el modelo, que optimizan sus utilidades y minimizan sus costos.

El rango de soluciones se encuentra en la venta de 252 toneladas al año de plástico reciclado contaminado con petróleo, lo que permite inferir, que se puede encontrar un resultado óptimo, en cuanto a la cantidad de toneladas a transportar, la ubicación de los distintos centros de recolección y manufactura, y a que cliente(s) vender.

IV. DISCUSIÓN

Los resultados son concluyentes, en cuanto a que es un modelo que permite obtener beneficios, en el plazo de un año. El objetivo de la presente investigación es optimizar una cadena logística inversa, y eso se logra, con resultados positivos. El plástico contaminado, como un sujeto de revalorización, no ha sido estudiado, por lo que resulta de interés, obtener resultados positivos sobre una materia, hasta el momento, no investigada. El modelo, al ser multiobjetivo, puede contener más variables y/o funciones objetivo a ser estudiadas. Al evidenciar que el modelo permite visualizar resultados coherentes, la posibilidad de ingresar más funciones y/o variables se hace más factible. Esta investigación solamente se centró en la disminución de costos, pero lo gravitante, fue poder modelar un sistema, que permite inferir, que funciona, y que puede ser expandido, conforme a las necesidades que surjan en futuros estudios.

V. CONCLUSIONES

1. Las interrogantes del presente modelo estaban centradas en poder determinar cuántos centros de reciclaje y manufactura se deben emplazar para desarrollar el modelo propuesto. Las funciones objetivo, por otro lado, buscaban maximizar las utilidades y disminuir los costos mediante la minimización de los viajes en camión. Los resultados obtenidos señalan que la solución se encuentra dentro del frente de Pareto (PF*) como está presentado en la gráfica. En el detalle de la solución, obtenida mediante software, se puede adquirir la cantidad de centros a emplazar.
2. La metodología utilizada fue exitosa, ya que permitió encontrar una solución para las interrogantes buscadas. Además, el hecho de haber obtenido las soluciones con algoritmos evolutivos permitió modificar las variables cuantas veces fue necesario, en un mínimo de tiempo (30 minutos). Esto permite adquirir resultados esperados, y modificar las conductas, en un tiempo bastante acotado, lo que entrega una novedad al proceso de formulación del

J. VALENZUELA-INOSTROZA, A. ESPINOZA-PÉREZ, M. ALFARO-MARCHANT

modelo. El hecho de trabajar con optimización multiobjetivo permitió minimizar costos y aumentar utilidades, en un solo modelo, lo que admite generar varias posibilidades de solución, en el Frente de Pareto.

3. Analizado el resultado positivo del modelo matemático utilizado, y llevándolo a una realidad local, podemos observar que, por defecto, se abstrae del entorno socio demográfico regional. Es por esto, que se sugiere para futuras investigaciones, la necesidad de establecer nuevas variables. Estas debiesen incorporar, por ejemplo, las sociales y económicas, para poder hacer más rentable este proyecto y hacerlo más atractivo a los stakeholders; la legislación, en el caso de contar con elementos que debiesen evaluarse bajo esta variable, etc. Así, estas variables sociales podrían ser determinantes en la implementación de modelos logísticos. Esto, ya que el modelo propuesto sigue siendo de un valor alto, con buenos resultados financieros, sin embargo, debe considerarse la mirada dentro de las políticas públicas, de tal manera que interactúen, ambas partes, para encontrar modelos suficientemente sostenibles económicamente, en el tiempo. A su vez, los gobiernos deben invertir en modelos logísticos basados en economía circular (o viceversa). Esto mediante consideraciones, como las hechas por Wang y otros, dónde la subvención o préstamos blandos deben ser entregados a las empresas, para poder desarrollar esta incipiente industria. 🏭

VI. REFERENCIAS

1. Bradley R, Jawahir I, Badurdeen F, et al. A total life cycle cost model (TLCCM) for the circular economy and its. *Resources, Conservation & Recycling*,. 2018 (135):141-9. ISSN 0921-3449.
2. Chari N, Venkatadri U, Diallo C. Design of a reverse logistics network for recyclable collection in Nova Scotia using compaction trailers. *INFOR Information Systems and Operational Research*. 2016 (54):1-18. ISSN 0315-5986.
3. CIPS. Chain / Reverse Logistics.2018. [Citado: 25 de Julio de 2018]. Disponible en: <https://www.cips.org/knowledge/procurement-topics-and-skills/sustainability/sustainable-an>.
4. De Angelis R. *Business models in the circular economy*. Cham, Switzerland: Springer Nature; 2018. ISBN 978-3-319-75126-9.
5. De La Hoz E, Vélez J, López L. Multiobjective linear programming model for reverse logistics in the polypropylene plastics industry. *Informacion tecnológica*. 2017 (28):31-6. ISSN 0718-0764. DOI 10.4067/S0718-07642017000500005.
6. M. F-C, W. S, F. P-J, et al. Redesign of a sustainable reverse supply chain under uncertainty. A case study. . *Journal of Cleaner Production*. 2017 (151):206-17. ISSN 0959-6526. DOI <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.057>.
7. Gaustada G, Krystofika M, Bustamante M, et al. Circular economy strategies for mitigating critical material supply issues. *Resources, Conservation & Recycling*. 135 (135):24-33. ISSN 0921-3449.
8. Hoornweg D, Bhada P. *What a Waste. A Global Review of Solid Waste Management*. 2012 (15). ISBN 978-1-4648-1347-4.
9. Lithner D. *Environmental and Health Hazards of Chemicals in Plastic Polymers and Products*: University of Gothenburg.; 2011.
10. Mavropoulos A. The tragic case of dumpsites.2015. [Citado: 02. DiC. 2018]. Disponible en: <https://www.iswa.org/nc/home/news/news-detail/article/wasted-health-the-tragic-case-of-dumpsites/109/>
11. M.M. P, Olfati M. . Volume 195 S, Pages . DOI:. Designing and solving a reverse logistics network for polyethylene terephthalate bottles. *Journal of Cleaner Production*. 2018;195(10):605-17. ISSN 0959-6526. DOI [10.1016/j.jclepro.2018.05.218](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.218)
12. Senthil S, Murugananthan K, Ramesh AVP-hdojjI. Analysis and prioritization of risks in a reverse logistics network using hybrid multi-criteria decision making methods. *Journal of Cleaner Production*. 2018 (179). ISSN 0959-6526. DOI <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.095>.
13. Turki S, Sauvey C, Rezg N, 441-458. Volume 193. 2018. Páginas 441-458. 2018. Modelling and optimization of a manufacturing/remanufacturing. *Journal of Cleaner Production*. 2018 (193):441-58. ISSN 0959-6526. DOI <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.057>
14. United Nations Environment Programme. *Global Waste Management Outlook*. Génova, Italia: United Nations Environment Programme; 2015. ISBN 978-92-807-3479-9.
15. Wang H, Li J, Li Y, et al. Evolution Process of Recycling Chain of Takeout Packages Based on Behavioural Science. *Neuroquantology*. 2018;16(5). ISSN 1303-5150. DOI [10.14704/nq.2018.16.5.1393](https://doi.org/10.14704/nq.2018.16.5.1393).