

Ingeniería y Ciencia

ISSN: 1794-9165

Escuela de Ciencias y Humanidades y Escuela de
Ingeniería de la Universidad EAFIT

Silva-Rodríguez1, Julián David

Diseño de una red de logística inversa: caso de estudio Usochicamocha - Boyacá

Ingeniería y Ciencia, vol. 13, núm. 26, Julio-Diciembre, 2017, pp. 91-113

Escuela de Ciencias y Humanidades y Escuela de Ingeniería de la Universidad EAFIT

DOI: 10.17230/ingciencia.13.26.4

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=83554561004>

Diseño de una red de logística inversa: caso de estudio Usochicamocha - Boyacá

Julián David Silva Rodríguez¹

Recepción: 17-04-2017 | Aceptación: 08-08-2017 | En línea: 14-11-2017

MSC:90C05, 49N05

doi:10.17230/ingciencia.13.26.4

Resumen

Este artículo presenta los resultados finales de una investigación adelantada en el distrito de riego Usochicamocha del Departamento de Boyacá - Colombia, el cual enfrenta un problema a causa de la no devolución y recolección de la totalidad de los envases y empaques vacíos de plaguicidas que generan los agricultores. Debido a lo anterior, con la investigación se propone una configuración y funcionamiento de la red de logística inversa (LI) para la recolección, acopio y disposición final de los residuos de plaguicidas en dicha zona, para lo cual se desarrolla un modelo de programación lineal entera mixta con el fin de definir tanto las cantidades a recolectar y transportar a disposición final y evaluar la posibilidad de abrir nuevos centros de acopio. Los resultados del modelo matemático evidencian que, en promedio, se recolectan en cada finca 5 kg de residuos y que se envían 1106.58 kg a eliminación segura y 1292.31 kg a reciclaje.

Palabras clave: Logística inversa; programación lineal; plaguicidas; retorno de envases ; disposición segura de envases; reciclaje

¹ Universidad de Boyacá, jdsilva@uniboyaca.edu.co, <http://orcid.org/0000-0001-7497-8632>, Tunja, Colombia.

Design of a Network of Reverse Logistics: Case Study Usochicamocha - Boyacá

Abstract

This paper presents the final results of an advance investigation in the Usochicamocha irrigation district of the Department of Boyacá - Colombia, which faces a problem because of the non - return and collection of all the empty packaging and packaging of pesticides that generate the farmers. Due to the above, the research proposes a configuration and operation of the reverse logistics network (LI) for the collection, collection and final disposal of pesticide residues in that area, for which a linear programming model was developed mixed in order to define both the quantities to be collected and transported to final disposal and to evaluate the possibility of opening new collection centers. The results of the mathematical model show that, on average, 5 kg of waste are collected on each farm and 1106.58 kg are sent to safe disposal and 1292.31 kg to be recycled.

Key words: Reverse logistics; linear programming; pesticides; return of containers; safe container disposal; recycling.

1 Introducción

Según [1], durante los últimos años, se ha evidenciado un crecimiento significativo en el desarrollo de investigaciones relacionadas con Logística Inversa (LI). En consecuencia, las empresas se han venido incentivando en diseñar e implementar sistemas de LI [2]; según Gallo *et al.* [3], las principales razones por las cuales las empresas realizan LI son: beneficios económicos, presiones legales y la creciente cultura ciudadana respecto al tema de devolución de productos, razones que coinciden con lo expuesto por [4] y [5], quienes afirman que al practicar LI se obtiene enormes beneficios económicos para la empresa. Varios autores han realizado sus investigaciones con el fin de lograr una definición de LI, [6] define LI como el papel de la logística en la devolución de productos, el reciclaje, la sustitución de materiales, reutilización de materiales, eliminación de residuos, así como la renovación, reparación y re fabricación. La definición más utilizada de LI es la propuesta por [7] en el Reverse Logistics Executive Council, la cual es definida como “El proceso de planificación, ejecución y control eficiente y rentable del flujo de materias primas, inventario en proceso, productos terminados e información relacionada desde el punto de consumo hasta el punto de

origen con el fin de recuperar valor o realizar una correcta eliminación". Autores como [8], clasificaron tres dimensiones de LI: la red de distribución inversa, sistemas de control de inventario con los flujos de retorno, y la planificación de la producción con la reutilización de piezas y materiales.

LI ha sido un tema que ha crecido poco a poco y ha dado origen a muchas investigaciones sobre el tema [9],[10]. Debido a lo anterior, varios autores como [4],[9],[10],[11], han descrito una extensa lista de sistemas de LI y sus estructuras, analizando la variedad de los problemas que surgen a raíz de esta. En consecuencia, los investigadores empezaron a centrar sus esfuerzos en diseñar sistemas de LI, con el fin de atacar los problemas relacionados con el deficiente manejo y tratamiento de los productos fuera de uso. Autores como [12],[13], han adelantado investigaciones con el fin de diseñar modelos de LI, para el control y buen manejo de materiales peligrosos. De igual forma [14],[15], han llevado a cabo investigaciones con el fin de diseñar sistemas de LI para la gestión y recuperación de productos fuera de uso en diferentes industrias como la informática, automotriz, entre otras.

Por otra parte, al momento de aplicar LI, las empresas buscan generar beneficios, logísticos, financieros y ambientales [11]. De esta forma, una manera correcta de lograr estos beneficios, es a través de la mejora ambiental de productos y procesos por medio de la aplicación de sistemas de LI, como por ejemplo la aplicación en los procesos de recolección y disposición final de residuos de plaguicidas que son aquellos envases o empaques vacíos de plaguicidas o material que haya tenido algún contacto con agroquímicos. Autores como [16],[17], han adelantado investigaciones sobre el tema, donde afirman que ha aumentado la preocupación por los riesgos que pueden generar, tanto en los seres humanos como en el medio ambiente, la eliminación inadecuada o el tratamiento indebido de los residuos de plaguicidas, convirtiéndose en un riesgo para la salud humana, ya que los agricultores reutilizan estos envases para uso doméstico.

Debido a lo anterior varios autores han empezado a centrar sus esfuerzos por realizar estudios cuyo objetivo se enfoca en la evaluación e identificación de los factores que llevan a los agricultores a realizar la devolución de envases y empaques de plaguicidas, al igual que la descripción de prácticas más comunes frente al manejo de estos residuos [18] y [19]. Por otra parte, [20], combinan LI con la recolección y disposición de envases de plaguicidas,

desarrollando una investigación con el objetivo de diseñar un sistema de LI para la recolección de envases y empaques vacíos de plaguicidas en una unidad de riego del departamento de Boyacá - Colombia, bajo los requerimientos de la norma ISO 9001:2008.

Dadas estas consideraciones, este artículo presenta los resultados finales de una investigación desarrollada en el distrito de riego Usochicamocha del departamento de Boyacá ? Colombia, en la cual se presenta un problema de manejo y tratamiento inadecuado de los residuos de plaguicidas por parte de los agricultores, causando contaminación al medio ambiente ya que en mucho de los casos entregan con los residuos de plaguicidas otros residuos como desechos orgánicos y domésticos y les dan un tratamiento inadecuado como arrojarlos a los ríos o caños, enterrarlos o quemarlos a cielo abierto y de igual forma problemas de salud, debido a que los envases plásticos son usados como contenedores de bebidas de consumo diario.

Debido a lo anterior, con la investigación a desarrollar se planteó una posible configuración y funcionamiento de la red de LI utilizada actualmente para la recolección, acopio y disposición final de los residuos de plaguicidas en dicha zona, con el fin de desarrollar un modelo de programación lineal entera mixta para el diseño de una red de LI y finalmente por medio de herramientas de la investigación de operaciones, proponer diversos escenarios de mejoras del sistema actual.

En este sentido, el presente artículo se estructura de la siguiente manera: en la Sección dos (2) se muestra la estructura metodológica, donde se explica cada una de las fases que se llevan a cabo para el diseño de la red de logística inversa. Luego, en la Sección tres (3) se muestran de manera sintetizada los resultados de la investigación. Finalmente, en la Sección cuatro (4) se presentan las conclusiones producto de la investigación desarrollada.

2 Metodología

La investigación desarrollada es un estudio de caso según los lineamientos de [21], la cual maneja dos niveles de investigación: descriptivo y experimental con un enfoque netamente cuantitativo. Para el diseño de la red de LI de envases y empaques vacíos de plaguicidas, se siguió la metodología expuesta por [22], la cual consta de las siguientes etapas:

ETAPA 1. Definición del Problema. En esta etapa se realizó un diagnóstico del proceso que se desarrolla actualmente en la unidad de riego para la recolección y acopio de los envases y empaques de plaguicidas. A través de la observación directa en las jornadas de recolección adelantadas por la empresa encargada, se describió detalladamente por medio de un diagrama de flujo el proceso actual de recolección de envases y empaques vacíos de plaguicidas.

En ese mismo sentido, se llevó a cabo la aplicación de 95 encuestas, las cuales se aplicaron a los agricultores de la zona por medio de un muestreo aleatorio simple con población finita, con el fin de identificar en primera instancia los factores que llevan a los agricultores a entregar o no sus residuos de plaguicidas al mecanismo de devolución y determinar las prácticas más comunes que realizan los agricultores con los residuos de plaguicidas. Posteriormente, se identificaron los predios de mayor generación de residuos de plaguicidas, de acuerdo a la actividad agrícola que realizan, estimando las cantidades y volúmenes de plaguicidas con base en las demandas de cada uno de los productos.

Igualmente se llevó a cabo entrevistas semi-estructuradas a los diferentes actores de participación del proceso como lo son comercializadores, empresa recolectora y empresa fabricante, con el objetivo de obtener la opinión y percepción que tienen cada uno de ellos frente a la forma como se está llevando a cabo el proceso de recolección, acopio y disposición final de los envases y empaques de plaguicidas, opiniones que serán tenidas en cuenta para el diseño de la red de LI. Finalmente, en esta etapa, se describieron todos los parámetros y variables que inciden en el proceso de recolección y acopio de los residuos de plaguicidas, excluyendo e incluyendo todos los aspectos necesarios de acuerdo con la delimitación de la investigación. Finalmente se determina el objetivo que tendrá el modelo matemático como posible solución al problema planteado.

ETAPA 2. Construcción del Modelo. En esta etapa se construyó un modelo matemático de programación lineal entera mixta, debido a que se incluyen variables continuas como lo son la cantidad de Kg a recolectar en las fincas y asimismo se incluyen variables discretas como los son las variables binarias con el fin de decidir si abrir o no un centro de acopio. En primera instancia se realizó una codificación de las variables y los parámetros definidos anteriormente, con el fin de facilitar la creación del modelo.

Inicialmente se determinó la función objetivo de acuerdo con el propósito definido en la etapa anterior. Seguidamente se determinaron las restricciones del modelo de acuerdo con las condiciones y delimitaciones actuales del proceso de recolección y acopio de los envases y empaques vacíos de plaguicidas.

ETAPA 3. Solución del Modelo. Se adelantaron visitas de campo con el fin de tomar los datos necesarios sobre cantidades generadas en cada unidad de riego, número de fincas que comprenden la unidad de riego, los cuales se tomaron durante las jornadas de recolección que se adelantaron durante los años 2015 y 2016. Seguidamente, a través de los comercializadores y fabricantes de los plaguicidas se recolectó información de las cantidades vendidas de plaguicidas para la unidad de riego bajo estudio. Igualmente, a través de la empresa que actualmente realiza el proceso de recolección de los residuos, se recolectaron datos históricos sobre cantidades recogidas en las jornadas de recolección. Finalmente, con la información organizada se alimentó el modelo para solucionarlo a través del software especializado de Investigación de Operaciones LINGO versión 14.

ETAPA 4. Validación del Modelo. A partir de la solución del modelo desarrollado en la etapa anterior, se realizó una validación teórica del modelo, donde se contrastó que dicho modelo planteado arrojaba los resultados que se esperaban y fueran acordes y confiables con el sistema actual. Asimismo, se plantearon y evaluaron posibles escenarios de mejora del sistema actual de recolección de los envases de plaguicidas, donde la empresa recolectora tendrá la posibilidad de implementar dichos escenarios de acuerdo con las mejoras sugeridas.

3 Resultados

3.1 Descripción distrito de riego Usocicamocha

El distrito de riego está ubicado en la cuenca alta de río Chicamocha en el Departamento de Boyacá, en jurisdicción de los municipios de Paipa, Duitama, Tibasosa, Nobsa, Sogamoso y Santa Rosa de Viterbo. El área beneficiada es de 11.300 hectáreas aproximadamente de las cuales 8.858 cuentan con infraestructura de Riego. De igual manera el sistema de riego

diseñado para la totalidad del distrito es por aspersión, que opera sistema de demanda controlada, el cual incluye 11 unidades independientes de riego con sistemas de suministro y aplicación las cuales son: Ayalas, Cuche, Duitama, Holanda, Las vueltas, Ministerio, Monquira, Pantano de Vargas, San Rafael, Surba y Tibasosa.

Durante la recolección de información se evidencio que el 62 % de las hectáreas productivas del distrito de riego son destinadas para la ganadería, donde se desarrollan actividades de crianza de ganado Holstein y Normando para la producción de leche, obteniendo una producción promedio anual de 359.016 litros. De igual forma, el 38 % de las hectáreas totales del distrito, representando a 3.556 hectáreas, son destinadas para la siembra de productos agrícolas, dentro de los cuales se encuentran cereales, tubérculos y hortofrutícolas. En la Figura 1 se puede evidenciar que las unidades de Cuche, Ayalas y Pantano de Vargas son las que destinan mayor cantidad de hectáreas para llevar a cabo sus actividades relacionadas con la ganadería. Igualmente, se evidencia que las unidades de San Rafael, Tibasosa y Monquira son las mayores productoras agrícolas dentro de los municipios que componen el distrito de riego.

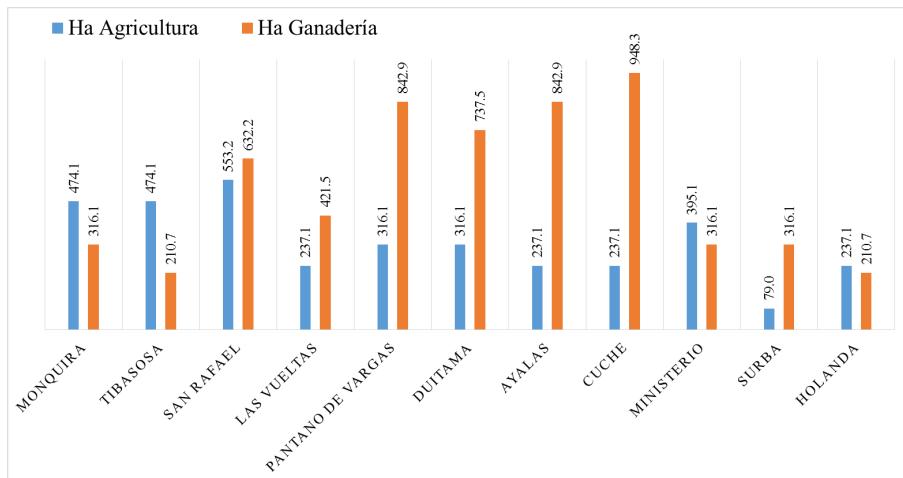


Figura 1: Actividades Económicas en las unidades de riego

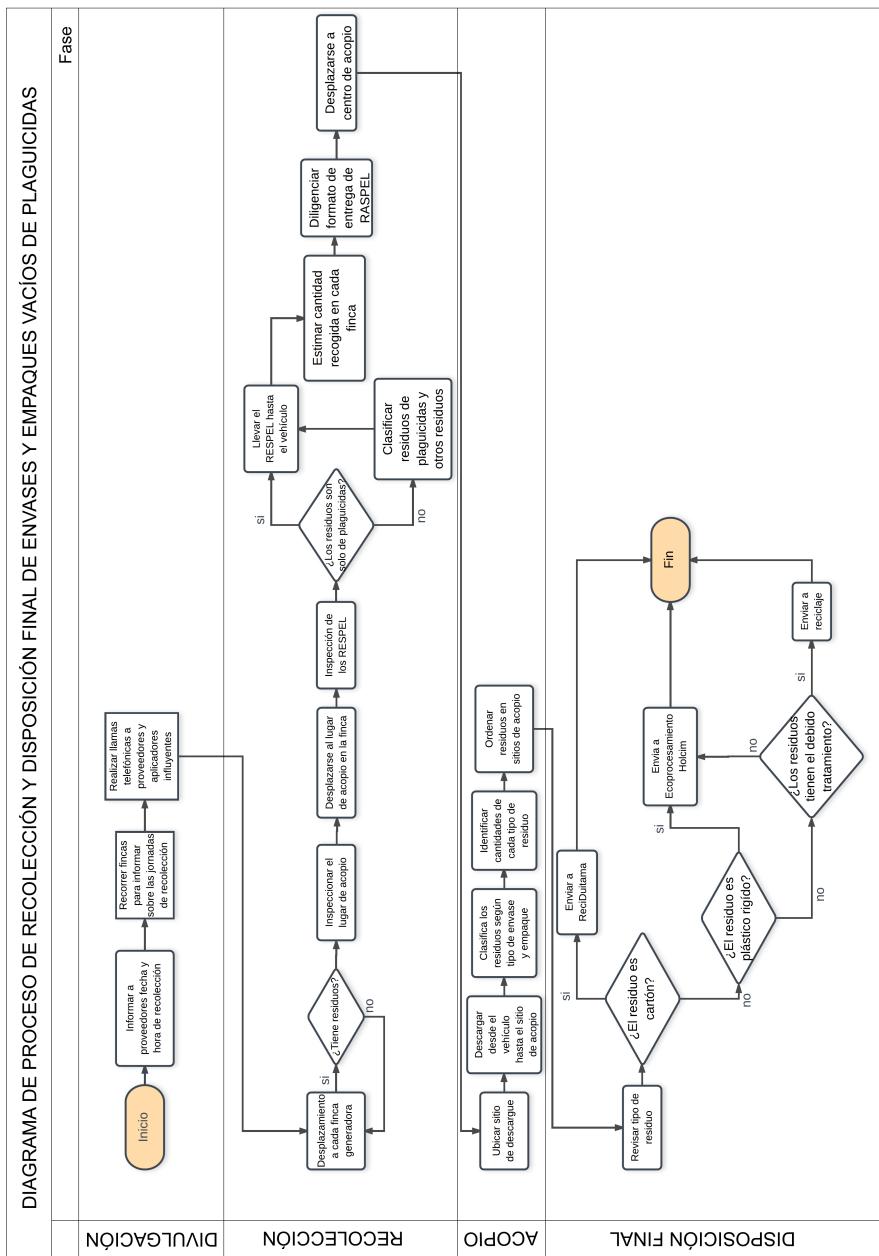
3.2 Descripción del proceso actual de logística inversa

El proceso de recolección y acopio de envases y empaques vacíos de plaguicidas que se desarrolla actualmente en el distrito de riego Usochicamocha, es llevado a cabo de forma totalmente empírica, ya que no tiene en cuenta las actividades propias de LI. Además, no se utiliza ninguna herramienta tecnológica o de ingeniería que aporte tanto en la planificación como en la ejecución de las jornadas de recolección. El proceso de LI que se desarrolla actualmente comprende 4 etapas: Divulgación, Recolección, Acopio y Disposición final. En la Figura 2 se muestra el diagrama de flujo del proceso bajo estudio, el cual lista todas las actividades que comprenden las etapas anteriormente mencionadas.

Fase de Divulgación. En esta etapa inicial, el distrito de riego con cooperación de la empresa recolectora y las empresas distribuidoras de los diferentes municipios que comprenden la zona bajo estudio, hace una propagación de información anticipada por medio de folletos o verbalmente donde se les comunica a los agricultores las fechas programadas para las jornadas. De igual forma, se realiza perifoneo, recorriendo los diferentes predios, donde se informa a los agricultores la fecha, el lugar de recolección y el tratamiento adecuado a los envases y empaques.

Durante las visitas de campo, se evidencio que solo se hace divulgación al 45.45 % del total de las empresas comercializadoras de agroquímicos que tienen influencia de compra para las unidades de riego que comprenden la ruta de recolección a llevar a cabo, lo que indica que no se está realizando un cubrimiento total de los comercializadores, dejando una población sin cubrir para brindar información sobre las jornadas.

Fase de Recolección. En esta etapa se traslada una volqueta, la cual recorre las fincas de cada unidad con el fin de que el generador haga entrega de los residuos de plaguicidas a la empresa encargada. En el trabajo de campo se evidenció que 2 de cada 11 fincas entregan sus envases clasificados y con el tratamiento adecuado, situación que ocasiona dificultad en el proceso de clasificación y procesamiento de los envases y además se incumple con el artículo 7 de la Resolución 693.

**Figura 2:** Proceso de logística inversa

Posteriormente el operario recolector ubica el sitio donde se encuentran situados los residuos de plaguicidas para efectuar una pre inspección de los residuos y observar que sean exclusivamente residuos de plaguicidas, además de detallar el estado en que se encuentran estos residuos. En el momento de tener asegurado los desechos, se procede a trasladarlos hasta el vehículo, donde se verifica el tipo y cantidad de los residuos entregados, diligenciando un acta de entrega de Residuos Peligrosos (RESPEL) firmado por el agricultor que realiza la entrega.

Fase de Acopio. Al finalizar el recorrido por la totalidad de las fincas, el vehículo se desplaza al centro de acopio correspondiente. En primera instancia en el centro de acopio, se ubica el sitio adecuado donde se realiza el descargue de los residuos recolectados. Posteriormente, el operario recolector procede a ordenar los residuos en el centro de acopio para apilarlos de forma segura, pero se observa que no se está realizando ninguna clasificación de dicho residuos.

Fase de Disposición Final. Una vez almacenados los residuos de plaguicidas de forma segura, se realiza una revisión de los diferentes tipos de residuos recolectados. Según datos de la empresa recolectora, se estima que el 10 % de los residuos recolectados, corresponden a cartón, el cual será enviado a la empresa Recitundama para reciclaje y al 90 % restante de residuos que está compuesto por material plástico rígido, lonas y bolsas aluminizadas, se le verifica las condiciones de dichos residuos, ya que aquellos que tengan el debido tratamiento serán enviados para reciclaje, con el fin de utilizarlos para la fabricación de nuevos productos como madera plástica y los residuos que no posean el tratamiento adecuado serán enviados a la empresa Holcim para realizarles eco procesamiento.

3.3 Modelo para diseño de red de logística inversa

El modelo desarrollado para el diseño de la red de LI de envases y empaques vacíos de plaguicidas, tiene en cuenta la estructura de la configuración actual de la red de LI que se venido utilizado por la empresa responsable, incluyendo los distintos eslabones de la cadena desde la entrega de los residuos por parte de los generadores hasta la disposición final de los mismos.

Adicionalmente, el modelo contiene factores importantes como el costo

de mano de obra en la que se incurren por cada jornada de recolección, así como las capacidades del vehículo y del centro de acopio donde finalmente son depositados los envases y empaques vacíos de plaguicidas generados por cada unidad de riego. Se desarrolló un modelo de programación lineal entera mixta, con el fin de determinar las cantidades a recolectar en cada una de las fincas por cada tipo de residuo y las cantidades a transportar a cada una de las alternativas de disposición final, para un periodo de planeación de un año dividido en 6 periodos de recolección, cada uno correspondiente a 2 meses. Igualmente evalúa la posibilidad de abrir nuevos centros de acopio. En la Figura 3 se observa el modelo matemático, estructurado sobre la red de LI para envases y empaques vacíos de plaguicidas, evidenciando los distintos eslabones que intervienen en dicha red y asimismo se observa los subíndices, variables y parámetros asociados con cada uno de los eslabones que componen la red.

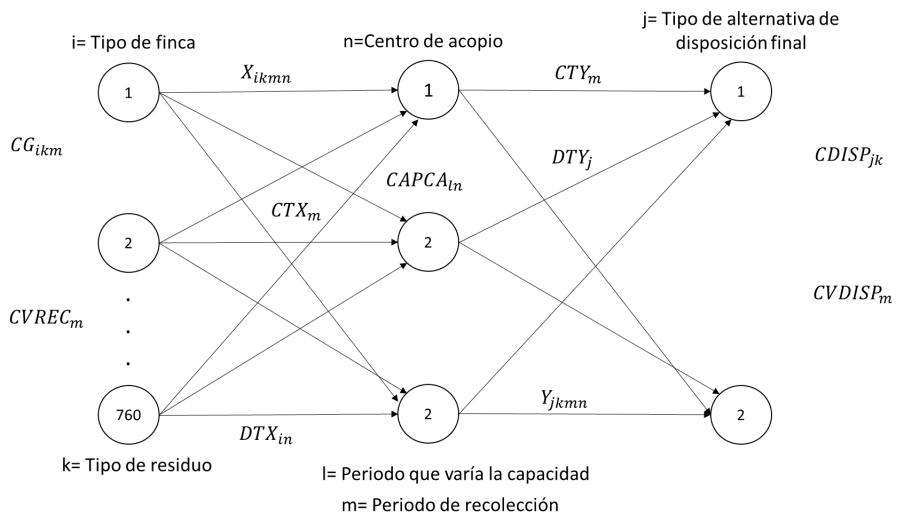


Figura 3: Estructura del Modelo de Logística Inversa

3.3.1 Parámetros CTX_m = Costo de transportar un kilogramo de residuo de plaguicida por kilómetro recorrido en el periodo m

CTY_{jm} = Costo de transportar un kilogramo de residuo de plaguicida

por kilómetro recorrido desde el centro de acopio hasta la alternativa de disposición tipo j en el periodo m

CA_n = Costo de apertura del centro de acopio tipo n

DTX_in = Distancia en kilómetros desde cada finca tipo i hasta el centro de acopio tipo n

DTY_{jn} = Distancia en kilómetros desde el centro de acopio tipo n hasta la alternativa de disposición final tipo j

CG_{ikm} = Cantidad de residuo tipo k generada por la finca tipo i en el periodo tipo m (kg)

CDISP_{jk} = Capacidad de procesamiento del residuo tipo k en la alternativa de disposición final tipo j (kg)

CVREC_m = Capacidad del vehículo recolector en el periodo m (kg)

CVDISP_m = Capacidad del vehículo para transporte a disposición final en el periodo m (kg)

CICA_n = Capacidad inicial del centro de acopio tipo n (kg)

3.3.2 Variables X_{ikmn} = Cantidad de residuo tipo k a recolectar y enviar desde cada finca tipo i hasta el centro de acopio tipo n en el periodo tipo m (kg)

Y_{jkmn} = Cantidad de residuo tipo k a enviar desde el centro de acopio tipo n para la alternativa de disposición final tipo j en el periodo tipo m (kg)

CAPCA_{ln} = Capacidad de almacenamiento del centro de acopio tipo n en el periodo tipo l (kg)

Z_n = Variable binaria que indica si abrir o no un centro de acopio tipo n

3.3.3 Formulación Matemática Función Objetivo: Esta ecuación (1) representa el costo total de la recolección y disposición final de los diferentes residuos de plaguicidas que se generan en las fincas del distrito de riego. Este costo incluye tanto el costo de transporte como el costo de mano de obra, asimismo para el cálculo del costo total se tienen en cuenta tanto las distancias que hay desde cada una de las fincas hasta el centro de acopio como la distancia que hay entre el centro de acopio y cada uno de los lugares donde lleva a cabo las diferentes alternativas de disposición final. Igualmente, la ecuación tiene el costo de inversión y funcionamiento de cada uno de los centros de acopio como posible alternativa de apertura.

$$\begin{aligned} MINZ = & \sum_i^{760} \sum_k^2 \sum_m^6 \sum_n^3 X_{ikmn} * CTX_m * DTX_{in} \\ & + \sum_j^2 \sum_k^2 \sum_m^6 \sum_n^3 Y_{jkmn} * CTY_{jm} * DTY_{jn} + \sum_n^3 CA_n * Z_n \quad (1) \end{aligned}$$

Restricción de cálculo de capacidad de centro de acopio: Esta ecuación (2) tiene como finalidad, realizar el cálculo de la capacidad que tendrá cada uno de los centros de acopio durante cada uno de los períodos de recolección, para lo cual en primera instancia se reducirá la capacidad descontando las cantidades que se recolectan en cada una de las fincas generadoras y posteriormente va aumentando la capacidad de acuerdo a las cantidades que se transporten desde el centro de acopio hasta cada uno de los lugares donde se realiza la disposición final de los residuos.

$$CAP_{ln} = CICA_n - \sum_i^{760} \sum_k^2 \sum_m^6 X_{ikmn} + \sum_j^2 \sum_k^2 \sum_m^6 Y_{jkmn} \quad \forall ln \quad (2)$$

Restricción de capacidad del centro de acopio: Esta ecuación (3) tiene como función restringir que la cantidad total de residuos de plaguicidas a recolectar en las fincas generadoras en cada periodo no podrán superar la

capacidad de cada centro de acopio para el periodo correspondiente, debido a que el centro de acopio solo podría almacenar los residuos de acuerdo con la capacidad disponible que posea en cada periodo.

$$\sum_i^{760} \sum_k^2 X_{ikmn} \leq CAPCA_{mn} * Z_n \quad \forall mn \quad (3)$$

Restricción de cantidad mínima a recolectar: Esta ecuación (4) tiene como objetivo, restringir que la cantidad a recolectar en cada finca de cada uno del tipo de residuos en cada periodo debe ser mayor o igual a la cantidad que genere esta.

$$\sum_n^3 X_{ikmn} \geq CG_{ikm} \quad \forall ikm \quad (4)$$

Restricción de equilibrio: Esta restricción (5) garantiza que la cantidad total de residuos de plaguicidas recolectadas en las fincas generadas hasta cada centro de acopio en cada periodo, sea igual a la cantidad total de residuos que se transportaran desde cada centro de acopio hasta cada una de las alternativas de disposición final en el mismo periodo, asegurando que no se presenten en almacenamiento o sin procesar residuos de plaguicidas en el centro de acopio.

$$\sum_i^{760} X_{ikmn} = \sum_j^2 Y_{jkmn} \quad \forall kmn \quad (5)$$

Restricción de capacidad de procesamiento de los residuos: Actualmente no existe restricción en cuanto a la capacidad de procesamiento de los residuos de plaguicidas, puesto que las empresas encargadas de la disposición final reciben cualquier cantidad de residuos. Esta ecuación se crea,

debido a que dependiendo el tipo de residuo tendrán una alternativa de disposición final y garantiza que se envíen de forma correcta de acuerdo con esto (6).

$$\sum_m^6 \sum_n^3 Y_{jkmn} \leq CDISP_{jk} \quad \forall jk \quad (6)$$

Restricción de la cantidad máxima a recolectar según la capacidad del vehículo recolector: Esta restricción (7) consiste en que la cantidad de envases y empaques vacíos que se recolecten en cada periodo, no debe ser mayor a la capacidad que tenga el vehículo recolector para transportar estos residuos de plaguicidas.

$$\sum_i^{760} \sum_m^6 \sum_n^3 X_{ikmn} \leq CVREC_m \quad \forall m \quad (7)$$

Restricción de la cantidad máxima a transportar para disposición final según la capacidad del vehículo: Esta restricción (8) consiste en que la cantidad total a transportar y enviar para cada una de las alternativas de disposición final no puede superar la capacidad de carga que posee el vehículo en cada uno de los periodos.

$$\sum_j^2 \sum_m^6 \sum_n^3 Y_{jkmn} \leq CV DISP_m \quad \forall m \quad (8)$$

Restricción de no negatividad para la cantidad a recolectar: Esta ecuación (9) es una restricción lógica, la cual indica que las cantidades a recolectar de cada tipo de residuo en cada una de las fincas y periodos correspondientes no podrán ser negativas.

$$X_{ikmn} \geq 0 \quad \forall ikmn \quad (9)$$

Restricción de no negatividad para la cantidad a enviar para disposición final: Esta ecuación (10) garantiza que las cantidades a enviar para disposición final en cada uno de los periodos debe ser mayor o igual a cero.

$$Y_{jkmn} \geq 0 \quad \forall jkmn \quad (10)$$

Restricción de no negatividad para la capacidad del centro de acopio: Esta restricción (11) indica que la capacidad del centro de acopio en cada uno de los periodos debe ser mayor o igual a 0.

$$CAP_{ln} \geq 0 \quad \forall ikmn \quad (11)$$

Restricción Binaria para apertura de Centro de Acopio: Esta restricción (12) hace que la variable que decide si abrir o no un centro de acopio solo tome valores de 0 y 1, tomando como falso o verdadero respectivamente.

$$Z_n = [0, 1] \quad \forall n \quad (12)$$

Para realizar la solución del modelo se hizo uso del software especializado de investigación de operaciones LINGO, para lo cual en primera instancia se llevó a cabo una codificación de los subíndices a utilizar en el modelo, donde posteriormente se asignaron los parámetros y variables correspondientes según la dependencia de los subíndices creados.

Una vez realizada la codificación y programación de la sintaxis necesaria, se da solución al modelo. En primera instancia se obtuvieron los resultados en cuanto a la apertura de los centros de acopio donde el modelo arroja que es conveniente solo mantener abierto el centro de acopio ubicado en Nobsa, debido a que posee capacidad suficiente para el acopio de la totalidad de residuos que se generan en el distrito de riego.

Por otra parte, el modelo desarrollado arroja como resultados las cantidades mínimas a recolectar en cada una de las fincas detalladas por tipo de residuo (envase o empaque) y por periodo de recolección. En la Tabla 1 se observan las cantidades en kilogramos a recolectar en algunas fincas del distrito, discriminadas por periodo de recolección y tipo de residuo. Asimismo, de acuerdo con los resultados obtenidos, se puede observar que en general la fincas que comprenden el distrito de riego están generando mayor cantidad de kilos de envases que de empaves, evidenciando que en total se recogerían 1,292.3 kg de envases y 1,106.6 kg de empaves, para cada periodo de recolección.

Tabla 1: Cantidad (Kg) de residuos de plaguicidas a recolectar

Finca	Empaque						Envase					
	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Periodo 4	Periodo 5	Periodo 6	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Periodo 4	Periodo 5	Periodo 6
Bonza	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
El jardin	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70
San cristobal	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40
El recuerdo	0.17	0.17	0.17	0.17	0.17	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18
Mi ranchito	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27
La despensa	0.37	0.37	0.37	0.37	0.37	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39	0.39
La cuadrita	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38
El cebadero	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34	0.34

Por otra parte, se evidencia que la cantidad de residuos a recolectar en cada una de las fincas es pequeña, ya en el 92.6 % de las fincas las cantidades a recolectar no superan los 5 kg y solo el 7.4 % de las fincas poseen cantidades superiores a 5 kg. Lo anterior se presenta, debido a que en promedio las fincas poseen una extensión de tierra de 1.5 hectáreas para llevar a cabo sus procesos agrícolas.

De igual forma al realizar la solución del modelo, se obtienen los resultados de las cantidades a transportar de cada uno de los tipos de residuos desde el centro de acopio a cada una de las alternativas posibles para disposición final (ver Tabla 2), donde se observan que dichas cantidades a transportar en cada uno de los periodos corresponden a la cantidad total recolectada, con el fin de garantizar que la cantidad total que se encuentra almacenada en el centro de acopio sea destinada para una correcta disposición final.

Una vez solucionado el modelo, se procede a realizar una validación

teórica, la cual consta en primera instancia de corroborar la coherencia de los resultados frente a las restricciones planteadas. De igual forma se verifica que los resultados arrojados por el modelo, sean acordes y representen las condiciones actuales del sistema bajo estudio. Por otra parte, se lleva a cabo un análisis de sensibilidad con el fin de evaluar posibles cambios que aporten al mejoramiento del sistema.

Inicialmente se presenta una restricción en cuanto a la capacidad del centro de acopio, la cual para todos los periodos es de 12.000 kg. Con el modelo propuesto esta capacidad presenta una holgura de 9601 kg de almacenamiento, sin embargo, actualmente lo que se viene realizando es tener en acopio grandes cantidades de residuos por períodos de más de 6 meses, lo que ocasiona en primera instancia deterioro o daño de los residuos por condiciones del ambiente y por ende se generen impactos negativos hacia el mismo y de igual forma, estos residuos quedan expuestos frente a posibles actos vandálicos de quema. Debido a lo anterior, esta capacidad podría ser reducida con el fin de prevenir dichos inconvenientes y teniendo en cuenta los resultados obtenidos la capacidad del centro de acopio podría ser de 2399 kg sin afectar el costo total de transporte.

Tabla 2: Cantidad (Kg) a enviar a disposición final

Período	Empaque		Envase	
	Reciclar	Ecoprocesamiento	Reciclar	Ecoprocesamiento
1	0	1106.58	1292.31	0
2	0	1106.58	1292.31	0
3	0	1106.58	1292.31	0
4	0	1106.58	1292.31	0
5	0	1106.58	1292.31	0
6	0	1106.58	1292.31	0

Seguidamente se presenta una restricción en cuanto a la capacidad del vehículo para llevar a cabo las jornadas de recolección, donde actualmente dicho vehículo tiene una capacidad de carga de 3000 kg. A pesar de que dicha capacidad podría reducirse a 2399 kg, los envases y empaques vacíos

presentan una característica importante en cuanto a sus dimensiones y debido a esto, dichos residuos tendrán más volumen que masa, por ende, el vehículo que se está utilizando actualmente es adecuado para las cantidades a recolectar.

En general, con el planteamiento del modelo se lograrían recolectar mínimo 1106.6 kg de empaques y 1292.4 kg de envases en la totalidad de fincas que comprenden el distrito de riego, recolectando una cantidad mínima de 2399 kg de residuos de plaguicidas. En comparación con la cantidad promedio que se están recolectando actualmente en la totalidad de las fincas del distrito (1760 kg de residuos), con el modelo propuesto se aumentaría en un 36 % dicha cantidad, logrando una mayor eficiencia en la jornada de recolección y por ende garantizar una mayor recolección de residuos de plaguicidas, lo que conlleva a la mitigación de problemas ambientales y de salud, ya que los agricultores al no tener residuos en sus fincas no podrán quemarlos, arrojarlos a ríos o utilizarlos para actividades domésticas, como se realiza actualmente.

Por otra parte, se llevó a cabo un análisis de sensibilidad con el fin de examinar los posibles cambios que se pueden realizar a las condiciones actuales que tiene el proceso de recolección y disposición final de envases y empaques vacíos de plaguicidas. Debido a lo anterior, se puede evidenciar que para los parámetros capacidad centro de acopio, capacidad vehículo recolector y capacidad vehículo disposición que actualmente se encuentran en 12.000, 3.000 y 8.000 kilogramos respectivamente, se podrían reducir hasta 2.399 kilogramos o más debido a que las cantidades que las cantidades que se están generando en las fincas que comprenden el distrito, son inferiores a esta propuesta, con el objetivo de reducir costos y tener un mayor control sobre las cantidades que se almacenan.

4 Conclusiones

La principal actividad económica de los municipios que comprenden el distrito de riego Usochicamocha es la ganadería, sin embargo, la agricultura tiene una importante participación, a pesar de que se destinan una canti-

dad mayor de hectáreas para la ganadería, el número de predios dedicados a la agricultura es mayor, pero con extensiones de tierra más pequeñas. Debido a lo anterior, y de acuerdo con el uso de plaguicidas, se identificó a las unidades de Holanda, San Rafael y Monquira, como las zonas de mayor generación de envases y empaques vacíos de plaguicidas.

Por otra parte, el proceso bajo estudio se compone de 4 etapas: divulgación de las jornadas, recolección de los residuos generados en cada finca, acopio del total de los residuos recolectados en la jornada y disposición final de los envases y empaques vacíos de plaguicidas, pero dicho proceso no se puede considerar como LI, debido a que no aplica actividades propias de la misma y no se utiliza ninguna herramienta tecnológica o ingenieril para la planificación y ejecución de las jornadas de recolección.

Asimismo, el proceso presenta varias falencias en sus distintas fases. En la fase de divulgación se evidencia que no se está anunciando a la totalidad de los comercializadores influyentes en la zona objeto de estudio y, además, según los agricultores, falta mayor información y capacitación sobre las jornadas de recolección. Los agricultores sugieren mejorar los medios de comunicación para la divulgación. En la etapa de recolección se observa que la mayor parte de los agricultores no entrega sus residuos clasificados, incurriendo en el incumplimiento de la normativa vigente, por lo cual se deberían realizar capacitaciones y mayor supervisión sobre el manejo de residuos peligrosos.

Como alternativa de mejora del proceso de divulgación, recolección, acopio y disposición final de los envases y empaques de plaguicidas, se planteó un modelo matemático haciendo uso de la Programación Lineal, con el fin de determinar las cantidades mínimas de residuos de plaguicidas a recoger en cada finca generadora del distrito de riego. Con el modelo propuesto se mejora el proceso en un 36 % respecto a la cantidad tanto de envases como empaques vacíos de plaguicidas en la totalidad de las fincas que comprenden el distrito.

Para futuras investigaciones se podrá determinar las rutas óptimas que se debería seguir para la ejecución de las jornadas de recolección, con el fin de realizar un cubrimiento a todas las fincas que comprenden el distrito de

riego y así mismo disminuir costos y tiempos de transporte.

Agradecimientos

El autor expresa su sincero agradecimiento al grupo de investigación LOGYCA del Programa de Ingeniería Industrial de la Universidad de Boyacá y al grupo de investigación OBSERVATORIO de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Igualmente, agradecen al distrito de riego uso CHICAMOCHA y a la corporación Campo Limpio que hicieron parte del proyecto.

Referencias

- [1] D. S. Rogers, B. Melamed, and R. S. Lembke, “Modeling and analysis of reverse logistics,” *Journal of Business Logistics*, vol. 33, no. 2, pp. 107–117, 2012. 92
- [2] A. Diabat, D. Kannan, M. Kaliyan, and D. Svetinovic, “An optimization model for product returns using genetic algorithms and artificial immune system,” *Resources, conservation and recycling*, vol. 74, pp. 156–169, 2013. 92
- [3] M. Gallo, T. Murino, and E. Romano, “The simulation of hybrid logic in reverse logistics network,” *Selected Topics in System Science and Simulation Engineering*, pp. 378–384, 2010. 92
- [4] D. S. Rogers and S. Ronald, “Going backwards: reverse logistics trends and practices,” 1999. 92, 93
- [5] M. J. Álvarez-Gil, P. Berrone, F. J. Husillos, and N. Lado, “Reverse logistics, stakeholders’ influence, organizational slack, and managers’ posture,” *Journal of business research*, vol. 60, no. 5, pp. 463–473, 2007. 92
- [6] J. R. Stock, *Reverse logistics: White paper*. Council of Logistics Management, 1992. 92
- [7] D. S. Rogers and R. Tibben-Lembke, “An examination of reverse logistics practices,” *Journal of business logistics*, vol. 22, no. 2, pp. 129–148, 2001. 92

- [8] M. Fleischmann, J. M. Bloemhof-Ruwaard, R. Dekker, E. Van der Laan, J. A. Van Nunen, and L. N. Van Wassenhove, “Quantitative models for reverse logistics: A review,” *European journal of operational research*, vol. 103, no. 1, pp. 1–17, 1997. 93
- [9] C. R. Carter and L. M. Ellram, “Reverse logistics: a review of the literature and framework for future investigation,” *Journal of business logistics*, vol. 19, no. 1, p. 85, 1998. 93
- [10] J. R. Stock and J. P. Mulki, “Product returns processing: an examination of practices of manufacturers, wholesalers/distributors, and retailers,” *Journal of Business Logistics*, vol. 30, no. 1, pp. 33–62, 2009. 93
- [11] V. D. R. Guide Jr and L. N. Van Wassenhove, “Or forum—the evolution of closed-loop supply chain research,” *Operations research*, vol. 57, no. 1, pp. 10–18, 2009. 93
- [12] T.-L. Hu, J.-B. Sheu, and K.-H. Huang, “A reverse logistics cost minimization model for the treatment of hazardous wastes,” *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol. 38, no. 6, pp. 457–473, 2002. 93
- [13] R. Verma, G. R. Plaschka, B. Hanlon, A. Livingston, and K. Kalcher, “Predicting customer choice in services using discrete choice analysis,” *IBM Systems Journal*, vol. 47, no. 1, pp. 179–191, 2008. 93
- [14] C. Lee and T. Chan, “Development of rfid-based reverse logistics system,” *Expert Systems with Applications*, vol. 36, no. 5, pp. 9299–9307, 2009. 93
- [15] M. Hosseinzadeh and E. Roghanian, “An optimization model for reverse logistics network under stochastic environment using genetic algorithm,” *International Journal of Business and Social Science*, vol. 3, no. 12, pp. 1–17, 2012. 93
- [16] S. Elfvendahl, M. Mihale, M. A. Kishimba, and H. Kylin, “Pesticide pollution remains severe after cleanup of a stockpile of obsolete pesticides at vikuge, tanzania,” *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, vol. 33, no. 8, pp. 503–508, 2004. 93
- [17] A. Buczynska and I. Szadkowska-Stanczyk, “Identification of health hazards to rural population living near pesticide dump sites in poland,” *International journal of occupational medicine and environmental health*, vol. 18, no. 4, pp. 331–339, 2005. 93
- [18] I. D. Haylamicheal and M. A. Dalvie, “Disposal of obsolete pesticides, the case of ethiopia,” *Environment international*, vol. 35, no. 3, pp. 667–673, 2009. 93

- [19] W. J. Ladeira, A. E. Maehler, and L. F. M. d. Nascimento, “Logística reversa de defensivos agrícolas: fatores que influenciam na consciência ambiental de agricultores gaúchos e mineiros,” *Revista de Economia e Sociologia Rural*, vol. 50, no. 1, pp. 157–174, 2012. 93
- [20] E. D. C. Castañeda, A. M. F. Benítez, and J. D. S. Rodríguez, “Diseño de un sistema de logística inversa para la recolección de envases y empaques vacíos de plaguicidas,” *Revista Ingeniería Industrial*, vol. 12, no. 2, 2013. 93
- [21] R. K. Yin, *Case study research: Design and methods.* Sage publications, 2013. 94
- [22] H. A. Taha, *Investigación de operaciones.* Pearson Educación, 2004. 94