

**MODELO DE LOGÍSTICA INVERSA PARA LA RECUPERACIÓN Y
APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS DE BATERIAS FUERA DE USO EN EL
NORTE DEL VALLE DEL CAUCA**

JENNY ALEXANDRA GARCÍA GALLÓN

JAVIER MILLÁN QUINTERO

DIRECTOR:

M.Sc. JUAN PABLO OREJUELA

UNIVERSIDAD DEL VALLE

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

2015

**MODELO DE LOGÍSTICA INVERSA PARA LA RECUPERACION Y
APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS DE BATERIAS FUERA DE USO EN EL
NORTE DEL VALLE DEL CAUCA**

JENNY ALEXANDRA GARCÍA GALLÓN

JAVIER MILLÁN QUINTERO

UNIVERSIDAD DEL VALLE

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

2015

AGRADECIMIENTOS

JAVIER MILLAN QUINTERO

Primero que todo quiero darle gracias a Dios, quien me lleno de sabiduría, vida y salud a lo largo del desarrollo de mi carrera. A mis padres Marianela Quintero y Javier Millán, quienes con su esfuerzo, cariño y paciencia me brindaron su apoyo en esta etapa de mi vida.

A mi familia y amigos quienes confiaron en mis capacidades y me apoyaron en momentos difíciles durante mi camino a la obtención del título. También quiero agradecer a mis compañeros de clase quienes se convirtieron en parte de mi familia, por su apoyo incondicional a lo largo de esta carrera, porque además de aprender a nivel académico también aprendí de todos ellos a nivel personal.

A mi compañera de trabajo Jenny Alexandra García, por su apoyo y amistad incondicional y esperamos que este trabajo se convierta en una herramienta para quien lo necesite y agradecerle a todo aquel que tenga la oportunidad de apreciarlo y ponerlo en práctica.

Por último agradecer a nuestro director de trabajo de grado el M.sC. Juan Pablo Orejuela, por su dedicación y apoyo en la construcción de este trabajo y el compromiso con el desarrollo académico de la universidad.

AGRADECIMIENTOS

JENNY ALEXANDRA GARCÍA GALLÓN

A Dios quien está presente en todas mis decisiones, por brindarme la oportunidad de superarme y salir a delante, a mis padres Aurelio García y Rubiela Gallón, que son mi motor para ser cada día una mejor persona, a los cuales quiero llenar de orgullo con cada triunfo, quienes me han apoyado incondicionalmente y en los momentos más difíciles han sido el aliento para continuar el camino, superando cada obstáculo.

A mis sobrinos Jhoan Sebastian y Samara, quienes me han hecho mostrar una faceta de mamá, quienes han despertado un amor incondicional e inigualable, y para los cuales quiero ser un gran ejemplo y apoyo.

A mi compañero Javier Millán Quintero, quien más que un amigo y pareja de trabajo ha sido un hermano y ha sabido complementarme para hacer una gran labor académica.

A nuestro director de trabajo de grado el M.sC. Juan Pablo Orejuela, por su dedicación y apoyo en la elaboración de este trabajo. Al M.sC. Carlos Alberto Rojas Trejos por ayudarnos a encontrar el derrotero en esta ardua labor.

Al Ingeniero Julián González Velazco, coordinador del programa de Ingeniería Industrial de la sede Zarzal, por ser un guía en el transcurso de nuestra carrera.

A todas las personas que han creído en mí y en mis capacidades, aquellos que me aprecian y se han ganado mi cariño, aportando un grano de arena para cumplir cada una de mis metas y sueños. ¡Muchas gracias!

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE TABLAS.....	7
LISTA DE GRAFICOS.....	8
INTRODUCCIÓN.....	9
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	11
2. JUSTIFICACIÓN.....	15
3. OBJETIVOS.....	17
3.1 OBJETIVO GENERAL.....	17
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
4. MARCO REFERENCIAL.....	18
4.1 MARCO TEÓRICO	18
4.1.1Desarrollo Sostenible.....	19
4.1.2Definiciones de Logística.....	19
4.1.3Definiciones de Logística Inversa	20
4.2 MARCO LEGAL	23
4.2.1 Leyes y Proyectos de Ley:.....	25
4.2.2 Resoluciones:.....	26
4.2.3 Marco Legal Internacional.....	26
4.3 BATERIAS Y PILAS	28
4.3.1 Residuos de Baterías y Pilas	32
4.3.2 Panorama Global de los Residuos de Baterías y Pilas.....	34
4.4 RECICLAJE DE RESIDUOS DE BATERIAS FUERA DE USO.	36
5. FACTORES RELEVANTES QUE INCIDEN EN LA APLICACIÓN DEL FLUJO INVERSO EN LA CADENA DE SUMINISTRO DE LAS BATERÍAS DE PLOMO ÁCIDO.....	40
5.1 RECOLECCIÓN.....	42
5.2 RECUPERACIÓN	42

5.3 APROVECHAMIENTO	43
5.4 CUANTIFICACIÓN DE LOS RESIDUOS PROVENIENTES DE BATERÍAS FUERA DE USO EN LA REGIÓN	45
5.5 OFERTA DE RESIDUOS DE BATERÍAS DE PLOMO ÁCIDO	46
6. FUNCIONES DE DESEMPEÑO EN MODELOS DE LOGÍSTICA INVERSA	50
7. FORMULACION Y VALIDACION DEL MODELO	65
7.1 GENERADORES DE RESIDUOS	65
7.2 CENTROS DE ALMACENAMIENTO	66
7.3 PLANTA DE APROVECHAMIENTO.....	66
7.5 DESCRIPCION MATEMATICA.....	68
8. ANALISIS DE RESULTADOS.....	72
8.1 Variación en la producción de residuos. (Oferta de baterías usadas).....	73
8.2 Variación en los costos de transporte:	76
8.3 Comparación con la situación actual del sistema	77
9. CONCLUSIONES	78
10. RECOMENDACIONES	80
BIBLIOGRAFÍA.....	81

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Actividades comunes de la logística inversa	23
Tabla 2. Normativa ambiental Colombiana vigente relacionada con la gestión de residuos sólidos	24
Tabla 3. Clasificación de pilas primarias según su composición química.....	29
Tabla 4. Clasificación de pilas secundarias según su composición química.....	29
Tabla 5. Impactos de las sustancias toxicas en la salud y el medio ambiente	33
Tabla 6. Ventajas y desventajas del reciclaje.....	37
Tabla 7. Matriz de valoración del impacto ambiental a lo largo de la vida útil de las baterías	41
Tabla 8. Impactos negativos del proceso de aprovechamiento de baterías según el tipo de tecnología	44
Tabla 9. Distribución del peso de las baterías fuera de uso en Colombia por tipo de residuo	47
Tabla 10. Tipos de decisiones en actividades de logística inversa	60
Tabla 11. Número de viajes hasta la planta según escenario	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 12. Inventario inicial del centro según escenario de oferta....	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 13. Inventario Inicial del centro según escenario CT. Crecientes	77

LISTA DE GRAFICOS

Gráfico 1. Razones de implementación de la logística inversa	15
Gráfico 2. Composición física de una batería.....	31
Gráfico 3. Proceso de aprovechamiento de las baterías fuera de uso	43
Gráfico 4. Tratamiento de baterías fuera de uso.....	49
Gráfico 5. Configuración general del modelo de logística inversa propuesto.....	65
Gráfico 6. Configuración del sistema propuesto	73
Gráfico 8. Utilidad según escenario.....	¡Error! Marcador no definido.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la población mundial muestra un acelerado crecimiento que conlleva al aumento del consumo de productos manufacturados a gran escala, esto implica un mayor volumen de producción por parte de las empresas, que satisfaga las necesidades del cliente, que sea de calidad y personalizado para satisfacer las demandas de la población y de otras empresas, lo que ocasiona que el mercado global obligue a las organizaciones a cambiar radicalmente sus formas de operación de acuerdo a estas necesidades. (Santos López & Santos De la Cruz, 2010).

Al aumentar la producción en masa ocasionada por el crecimiento acelerado de la población, aumenta también la cantidad de residuos y de productos fuera de uso, que traen consigo un impacto ambiental significativo. Actualmente la sociedad se está preocupando cada vez más en la preservación del medio ambiente, obligando a las compañías fabricar productos o servicios amigables con éste, transformando el concepto de lo que antes era un valor agregado para el producto, en una exigencia del cliente; además permite que las empresas apliquen estrategias como la reutilización de residuos para conseguir una reducción de costos, disminuir el impacto al medio ambiente y con esto obtener una ventaja competitiva.(Cardona, 2007).

Las cadenas de suministro se encuentran en un proceso de transformación de acuerdo a los avances tecnológicos y la diversificación de los mercados globales. Sus gerentes buscan diseñar estrategias que permitan hacer frente a los nuevos retos de la logística en cuanto a la complejidad que afrontan las operaciones, entre ellas el retorno de los residuos al lugar de producción donde van a formar parte del stock de materia prima para ser procesados nuevamente, esto se conoce como Logística Inversa. (Ballesteros & Torres, 2014)

La logística inversa comienza desde el cliente final y permite gestionar eficientemente los procesos de retorno de productos al final de su vida útil o productos inconformes, ya sea que se trate de devoluciones, reutilización, re fabricación o reciclaje, de esta forma se puede recuperar el valor que aún pudieran incorporar o proceder a su adecuada eliminación(Rubio Lacoba, Miranda González, Chamorro Mera, & Valero Amaro, 2007), y su integración a la cadena de suministro

resulta ser una ventaja competitiva que genera disminución de costos y responsabilidad ambiental.

En este orden de ideas, el presente proyecto de investigación a través de una revisión documental y un diagnóstico de la situación actual, propone un modelo de logística inversa que incluye las variables necesarias de un escenario real; como capacidad de almacenamiento, costos de transporte, oferta de residuos, entre otras, que permita representar los factores clave de la logística inversa; permitiendo realizar ajustes o adaptaciones en aplicaciones particulares de cadenas de suministro con el fin de incrementar el ingreso generado por cantidad de materia recuperado y mitigar el impacto negativo al medio ambiente.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La gestión Ambiental empresarial ha ido evolucionando de una preocupación por la escasez de los recursos naturales, a un concepto más amplio de sostenibilidad y desarrollo, no sólo ambiental sino social y económico; un desarrollo cada vez más impactante y complejo. Ello ha dado lugar a soluciones como el reciclaje y la re-manufactura que han tenido que evolucionar con el mismo dinamismo. Sin embargo, dichas opciones no tendrán mayor efectividad sin un adecuado sistema logístico, que permita optimizar, no sólo la recuperación de los materiales y productos desechados, y su retorno al sistema productivo, sino su enlace con los modelos productivos tradicionales.(Monrroy & Ahumada, 2006)

La posibilidad de recuperar y aprovechar los residuos generados en los procesos productivos se comenzó a considerar realmente a partir de la década de los años 70 del siglo XX. Desde entonces, las empresas se han preocupado, en mayor o menor medida por adaptar su proceso de operaciones para reducir el consumo de materias primas, disminuir la generación de residuos, e intentar recuperar la mayor parte de éstos, principalmente de actividades de reciclaje.(Rubio, 2003)

A partir de los años 80, la sociedad intenta modificar progresivamente actitudes y normas de conducta que le permitan obtener mejoras en su entorno ambiental, o al menos reducir el impacto negativo que ejerce sobre el medio ambiente. De esta forma, términos tales como contaminación, impacto ambiental, efecto invernadero, residuos, reciclaje, agricultura ecológica y ahorro energético se han convertido en la actualidad en temas de interés. El mundo industrial y empresarial no ha sido ajeno a esta situación y ha comenzado a considerar los aspectos ambientales y ecológicos como variables de decisión a la hora de formular su estrategia empresarial.

Un dato significativo de las multinacionales y los grandes grupos empresariales por el medio ambiente, es la inclusión de una memoria medioambiental dentro de la información que ofrecen a sus accionistas. Si esta actuación viene condicionada, principalmente, más por imperativos legales que de mercado, pero en cualquier caso, cada vez son más las empresas que incorporan en su gestión consideraciones medioambientales realizadas tanto por los mercados como por la legislación actual: “el modelo socioeconómico se está transformando en un modelo económico socio-

ecológico por lo que la empresa actual, para ser competitiva, debe conseguir entrelazar la calidad, la innovación y el medio ambiente”.

No sólo el factor ambiental influye en la recuperación de residuos para ser reprocesados, también la búsqueda de una reducción de costos de producción; hacen llamativo el concepto de logística inversa. La logística inversa es un concepto poco conocido, o al menos novedoso, para muchos profesionales. Aunque en un primer momento, las referencias a este término aparecieron en revistas profesionales y de divulgación (sobre transporte y distribución principalmente) en los últimos años la logística inversa se ha abierto una brecha, pequeña aún, dentro del ámbito académico. (Rubio, 2003)

Han sido muchas las definiciones que se han formulado sobre el concepto de logística, y en todas ellas se establece un único sentido para el flujo de materiales y productos que circula a través del sistema logístico desde el productor hacia el consumidor. Hoy en día existe la posibilidad de recuperar y aprovechar económicamente aquellos productos que dejan de satisfacer las necesidades del consumidor; dicha recuperación genera un flujo de materiales y productos desde el consumidor hasta el productor, que por oposición al tradicional flujo logístico productor-consumidor se denomina logística inversa o función inversa de la logística. (Cure Vellojín, Meza González, & Amaya Mier, 2006)

Como datos relevantes de la investigación se encontró que Colombia produjo alrededor de 200 kg de residuos municipales per cápita en 2011. Se estimó que en el 2010 se recuperaron 1,8 millones de toneladas (alrededor de 40 kg per cápita) de vidrio, papel y cartón, metales y plásticos de los hogares, el comercio, las instituciones y la industria.

En el 2012, la gestión de los residuos domésticos cubría el 80,4% de los hogares, la cobertura de estos servicios ha aumentado desde un 83% de la población urbana, en 1993 hasta un 97% en 2012, pero aún es limitada en las zonas rurales (22%). Los rellenos sanitarios siguen siendo la principal forma de tratamiento de los residuos municipales y representa el 92% del total tratado. La proporción de manejo inadecuado de residuos se redujo del 27% al 7% entre 2005 y 2011. A pesar de este progreso, Colombia no alcanzó su meta de 2010 respecto de la eliminación de residuos en sitios apropiados en el 100% de las municipalidades. En 2011, se produjeron aproximadamente 174.000 toneladas de residuos peligrosos, casi la mitad

proveniente de actividades mineras. Del total, 158.000 toneladas se manejaron mediante recuperación (21%), tratamiento (43%) y eliminación final (36%). El resto fue almacenado temporalmente. (OECD/ECLAC, 2014).

En relación al resultado de los estudios técnicos realizados por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial en el año 2008, sobre la generación y gestión de residuos de baterías y pilas se concluyó lo siguiente:

En promedio al año se generan 11.000 toneladas de residuos de baterías y pilas en el país, de las cuales 8.000 toneladas corresponden a pilas zinc carbón, 2.000 toneladas a pilas alcalinas y el resto lo componen los residuos de pilas secundarias y de botón.

En los últimos 7 años se han generado y dispuesto en los rellenos sanitarios y botaderos a cielo abierto en Colombia cerca de 77.000 toneladas de residuos de baterías y pilas.

Entre el 2002 y el 2008, se han descargado al ambiente cerca de 14.000 toneladas de zinc, 13.000 toneladas de magnesio, 60 toneladas de cadmio, 15 toneladas de cromo, 100 toneladas de níquel, 15 toneladas de plomo, 350 kg de mercurio y 350 kg de litio, especialmente a los rellenos sanitarios y botaderos a cielo abierto, provenientes de las baterías y pilas que desechan los consumidores junto con la basura doméstica.

El 80% de los desechos de baterías y pilas se disponen en rellenos sanitarios y que el restante 20% va a parar a botaderos y otros sitios de disposición final no adecuados.(Álvares, 2011).

La batería gastada, debido a su contenido de plomo y ácido sulfúrico, se ha convertido en un residuo peligroso y no puede descartarse como cualquier residuo domiciliario. Por otra parte, una batería de plomo-ácido es un producto cuyos materiales pueden ser reciclados en su totalidad. La batería de plomo fuera de uso está catalogada como residuo especial y como tal, debe ser gestionada según los procedimientos especificados en las leyes relativas a residuos.

El negro historial medioambiental de muchas fundaciones recuperadoras de plomo, el derramamiento del ácido en el alcantarillado o en suelos, el abandono de

vehículos con sus baterías fuera de los espacios adecuados para su disposición, las operaciones clandestinas de deshuese o las exportaciones masivas e incontroladas de millones de baterías de plomo fuera de uso, a países en vías de desarrollo sin producción primaria, son costumbres extendidas que convierten a la batería de plomo fuera de uso en un residuo especial cuya gestión debe ser optimizada en el ámbito mundial.

Con base en lo anterior, se puede inferir que el reto actual de las organizaciones es integrar de manera adecuada la logística inversa en la cadena de suministro, lo que con lleva a realizar un estudio más arduo, dado que los casos de aplicación en Colombia son pocos y la implementación de la logística inversa en la cadena de suministro requiere de asesoría externa. Como es el caso de algunas empresas como MAC S.A, que produce baterías para autos. En 1990 implementó un sistema de logística inversa que consiste en recolectar las baterías de autos (propias y de la competencia), reciclarlas para recuperar los materiales de plomo y polipropileno. También la alianza Tetra Pack Colombia, RIO S.A y Cantonal S.A. Tetra Pack S.A es una multinacional sueca y formó una alianza con RIO una empresa colombiana, para reutilizar el material producido por Tetra Pack en la producción de madera sintética (Ecoplack) y con la empresa Colombiana Cantonal para reutilizar este material en la producción de cartón gris. Igualmente la empresa Cristalería Peldar S.A, una empresa productora de vidrio, ha implementado un proceso de logística inversa que consiste en recolectar vidrio estirado, reciclarlo e incorporarlo al proceso de producción normal. (Monrroy & Ahumada, 2006).

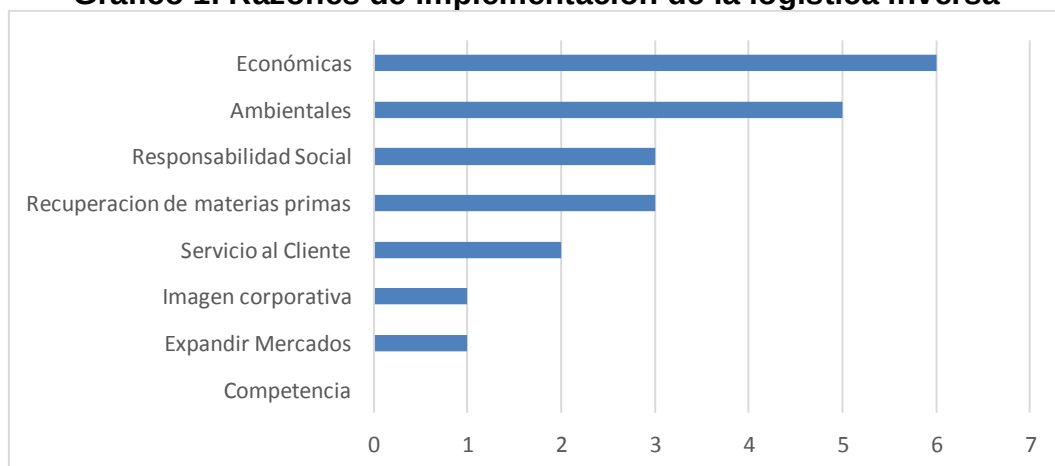
En ocasiones la integración de este concepto en la cadena de suministro no se realiza de forma adecuada incurriendo en altos costos de retorno de los residuos que regresan al proceso de producción, ésta es una de las razones por las cuales las empresas temen implementar la logística inversa. De esta manera la pregunta que pretende abordar el presente proyecto es la siguiente: ¿Cómo recuperar de manera más efectiva residuos provenientes de baterías fuera de uso en el norte del valle del cauca?

2. JUSTIFICACIÓN

La logística inversa ha comenzado el desarrollo de una fuerte revolución empresarial y puede llegar a convertirse en una muy buena oportunidad de negocios, que cumpliendo con las disposiciones legales de cada país será una estrategia corporativa para rescatar y preservar el medio ambiente. La implementación de las actividades referentes a este flujo inverso de la logística no sólo permite la recuperación de residuos, subproductos o cualquier otro material susceptible a la recuperación de valor en toda la cadena de suministro, sino que su potencial crecimiento también pueda atenuar o disminuir los costos logísticos directos en las organizaciones. (Ballesteros Riveros & Ballesteros Silva, 2007).

Las empresas Colombianas tienden a recuperar los productos en la etapa de post-consumo, de mano de los consumidores directos para evitar los problemas que se presentan con los intermediarios como centros y bodegas de reciclaje. Lo que indica que el sistema de logística inversa se aplica no sólo con fines económicos y ambientales, sino también con el fin de entrar en contacto con el cliente final y tener en cuenta sus necesidades; de esta manera se logra retroalimentar el proceso productivo. Sin embargo como la mayoría de las empresas trabajan bajo una política de desarrollo sostenible, las variables que impulsan la logística inversa son las económicas, ambientales y las que conciernen al desarrollo social. (Monrroy & Ahumada, 2006)

Gráfico 1. Razones de implementación de la logística inversa



Fuente: Adaptado de (Monrroy & Ahumada, 2006).

Lo anterior permite concluir la relevancia de la integración de la logística inversa a la cadena de suministro de las empresas y los beneficios obtenidos como: reducción de costos logísticos, reducción de costos de conversión, disminución del impacto ambiental generado por la producción y la retroalimentación del proceso por el contacto con los clientes. Por lo tanto la presente investigación está orientada al diseño de una cadena de suministro integrando el concepto de logística inversa para una empresa manufacturera de la región enfocada en el logro de éstos beneficios.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar un modelo que permita integrar los aspectos más relevantes de la logística inversa para la recuperación y aprovechamiento de residuos de baterías fuera de uso en el norte del valle del cauca.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar los factores relevantes que inciden en la aplicación del flujo inverso de la logística en la cadena de suministro de las baterías plomo ácido.
- Identificar cómo han sido las diferentes funciones de desempeño, y cómo se han representado las relaciones relevantes, con el propósito de determinar las principales características a involucrar en el modelo.
- Validar el modelo de la cadena de suministro a través de un caso de estudio.

4. MARCO REFERENCIAL

4.1 MARCO TEÓRICO

La cadena de valor es la manera sistémica de entender cómo las interacciones dentro de una empresa funcionan. Adicionalmente la cadena de valor de una compañía se integra a un sistema de valor equivalente al hablar de la relación de la cadena de valor particular, con el mercado al que pertenece y cómo esta interacción constante hace que se modifique y se mejore constantemente. Es esta cadena de valor a la que hace parte la logística y en donde se utiliza como herramienta organizacional para aumentar el valor, calidad, eficiencia de un producto y/o proceso en particular. La cadena de valor anteriormente mencionada contiene otra serie de sistemas dentro de los cuales se puede mencionar la cadena de abastecimiento.(Puentes, 2014).

La cadena de valor aportará todos los elementos que definen el costo último del producto, mientras que la cadena de abastecimiento muestra las relaciones y movimientos unidireccionales o multidireccionales que llevan el producto entre diferentes etapas del proceso desde su origen como materia prima hasta que está completamente terminado en manos del cliente. Dentro de esta cadena de abastecimiento así como se dijo anteriormente se puede mencionar a la logística y sus agentes como actores fundamentales del proceso. Sin la logística los procesos productivos asociados a la cadena de valor no tendrían orden coherencia y serían intrínsecamente ineficientes.(García Cáceres & Olaya Escobar, 2006)

A la hora de hablar de una investigación asociada a la práctica e implementación de las actividades logísticas, es necesario entender que hacen parte del concepto teórico general de competitividad que se entiende desde el valor agregado que las diferentes compañías le dan a sus bienes y servicios para hacerlas resaltar sobre otras y más importante en este caso en particular, hay que hablar del desarrollo teórico vinculado a la cadena de valor o aprovisionamiento. Y es en este punto, en el cual la cadena de abastecimiento debe ser entendida no como un todo asociado a una empresa, compañía u organización, sino como una serie de eslabones de pequeñas actividades discretas de la organización que interactúan entre sí con un solo propósito. (Uruguay, 2013).

Adicional a lo mencionado y debido a que el factor social del proyecto de investigación y la implementación del modelo propuesto se fundamenta en la preservación del medio ambiente y el desarrollo de modelos sostenibles, es necesario incluir en el estudio la sustentación bajo la cual se fundamentan las teorías y protocolos de cuidado ambiental asociados al proceso.

4.1.1 Desarrollo Sostenible

Actualmente al hablar de desarrollo es indispensable pensar en el desarrollo sostenible, que consiste en metodologías que permitan un desarrollo económico que satisfice las necesidades del presente, sin comprometer y/o sacrificar las capacidades de las generaciones futuras para satisfacer sus propios requerimientos (Gutiérrez, Benayas, & Calvo, 2006). El desarrollo involucra la aplicación de recursos humanos, físicos, naturales y financieros para satisfacer la demanda del mercado efectiva y otras necesidades humanas.

Si bien la sostenibilidad se comprende más fácilmente con relación a los recursos renovables, tiene también sentido para los no renovables, tal como se estableció en la Declaración de Estocolmo: "Los recursos naturales no renovables del planeta deben ser empleados de tal forma que se protejan contra el peligro de su agotamiento futuro y se asegure que sus beneficios sean compartidos por toda la humanidad". (Rodríguez Becerra, 1994)

Dicho esto, el desarrollo sostenible y su importante evaluación al aplicar un modelo permite mantener un balance entre sus tres componentes que son económicos, sociales y ambientales, los cuales hay que tener en cuenta a la hora de tomar decisiones a nivel gubernamental y corporativo.

4.1.2 Definiciones de Logística

Según (Monterroso, 2000) logística es un término que frecuentemente se asocia con la distribución y transporte de productos terminados; sin embargo, ésta es una apreciación parcial de la misma, puesto que la logística se relaciona con la administración del flujo de bienes y servicios, desde la adquisición de las materias primas e insumos en su punto de origen, hasta la entrega del producto terminado en

el punto de consumo. Señala a su vez el mismo autor, que la logística como actividad empresarial es antigua y sus inicios están asociados a la actividad militar, donde se desarrolló esta herramienta para abastecer a las tropas con los insumos necesarios, a fin de afrontar las largas jornadas en situación de guerra.

Dentro de los conceptos de logística mucho se ha dicho y aun se estudia y lo que sí es de entenderse al respecto así como lo plantea S. L. A. Marshall, la logística es la base de toda operación ya sea militar, productiva, operativa, de gestión, de servicio, etc. Y debe hacerse dentro de entornos que permitan conocer sus variables y cómo están actuando en tiempo real dentro de un sistema, así como delimitar los alcances de cada una de esas variables y mantenerlos en ese rango. (Brannstrom & Sumpter, 2005)

De esta forma, todas aquellas actividades que involucran el movimiento de materias primas, materiales y otros insumos forman parte de los procesos logísticos, al igual que todas aquellas tareas que ofrecen un soporte adecuado para la transformación de dichos elementos en productos terminados como las compras, el almacenamiento, la gestión de inventarios, el mantenimiento de las instalaciones y maquinarias, la seguridad y los servicios de planta (suministros de agua, gas, electricidad, combustibles, aire comprimido, vapor, etc.).

La logística en flujo directo no considera aspectos ambientales de forma intrínseca, pues su fin es netamente operacional y organizacional y se dejan al azar o a consideración de la legislación particular concerniente, sólo prevaleciendo las necesidades operativas. Así mismo, todos los costos logísticos se convierten en costos operativos en función de las necesidades del proceso, pero muchas veces no representan valor adicional al proceso, caso contrario de la logística inversa, en el cual los costos pueden superar a los costos de la logística directa.

4.1.3 Definiciones de Logística Inversa

A lo largo de la historia se han diseñado y enfocado estrategias en el sentido proveedor-cliente de tal manera que se crean nuevos métodos de distribución, nuevos productos, métodos de embalaje, lo cual causa un aumento de residuos cuando el consumidor final ya deja de usar este bien o servicio. La gestión adecuada de estos residuos requiere actividades y recursos con la finalidad de minimizar el

impacto ambiental. Por lo tanto, existe la necesidad de plantear una nueva cultura empresarial que tenga en cuenta en sus estrategias, diseños y procesos productivos, tales como el consumo de energía y materias primas, cantidad y tipo de materias primas, la emisión de sustancias contaminantes y la generación de residuos.

Existen diferentes definiciones sobre el término de logística inversa, algunos autores lo hacen de manera independiente y desligándola del flujo directo y la cadena de suministro, así como también existen autores quienes notan la importancia de considerar ambas direcciones del flujo y su beneficio en la cadena de suministro.

Una de las primeras descripciones de la logística inversa se dio por Lambert & Stock (1981). Aquí se describe logística inversa como "ir de manera equivocada en una calle de sentido único, porque la gran mayoría de los envíos de productos de flujo en una sola dirección". Esto es similar a la definición de Murphy (1986), en donde logística inversa es conocido como "el movimiento de mercancía desde el consumidor al productor en un canal de distribución".(Garzón, 2008)

Algo similar se define en el trabajo de (Rubio Lacoba et al., 2007), quienes la definen como el proceso de planificación, desarrollo y control eficiente del flujo de materiales, productos e información desde el lugar de origen hasta el de consumo de manera que se satisfagan las necesidades del consumidor, recuperando el residuo obtenido y gestionándolo de tal manera que sea posible su reintroducción en la cadena de suministro, obteniendo un valor añadido y/o consiguiendo una adecuada eliminación del mismo.

En (Reyes, 2009) se aborda el concepto de logística inversa como un proceso de apoyo para lograr la eco-eficiencia, enfatizando que el nuevo flujo, opuesto al flujo directo convencional de la cadena de suministro, debe ser gestionado adecuadamente afirmando que, "El concepto de logística inversa (reverse logistics) incluye no sólo el transporte del producto usado desde el usuario final hasta al productor, sino también la transformación de los productos retornados en productos nuevamente utilizables.

Para(Balli Morales, 2012) logística inversa es el proceso de proyectar, implementar y controlar un flujo de materia prima, inventario en proceso, productos terminados e información relacionada desde el punto de consumo hasta el punto de origen de una forma eficiente y lo más económica posible con el propósito de recuperar su valor o

el de la propia devolución. Sin embargo el término de logística Inversa o reversa no sólo se utiliza para hacer referencia al papel de la logística en el retorno del producto, sino también a la reducción en origen, reciclado, reutilización de materiales, sustitución de materiales, eliminación de residuos y desperdicios, reparación y re-manufacturación de los mismos. Su introducción ha sido el resultado de la creciente conciencia medioambiental en los países industrializados, por causa de los problemas derivados de la recolección de residuos y de productos o componentes usados y su reciclaje.

Dicho esto, se puede definir la logística inversa, como el proceso de planificación, implantación y control de una forma eficiente, del flujo de materias primas, fabricación, distribución y consumo, que va desde el cliente final hacia el productor. La logística inversa se integra a la cadena de suministro para cerrar el ciclo de las operaciones de un negocio, relacionado con la gestión de los desechos, los residuos y los desperdicios generados. Este enfoque puede ser analizado en cada eslabón de la cadena productiva de manera individual.

Este proceso surge debido a diferentes fuerzas, entre las que se encuentran económicas, legislativas y de mercadeo. Las empresas visualizaron una oportunidad en la reutilización de materiales dentro de los procesos de fabricación y una reducción de inventarios para de esta forma disminuir costos, lo que intrínsecamente los hace más competitivos, de otro lado, los gobiernos se interesaron en el medio ambiente obligando a las empresas a disminuir el impacto ambiental que se genera por los diferentes procesos que se llevan a cabo dentro de éstas. Finalmente, las empresas hacen ver a los clientes el hecho de la responsabilidad extendida y éstos deciden comprometerse también con el medio ambiente, convirtiéndose así en un elemento fundamental dentro de este proceso de logística inversa.

Dentro de este proceso, se debe tener en cuenta el material tanto del producto como del empaque para así poder determinar las actividades que se deben realizar con cada uno de éstos. En la **Tabla 1**. Actividades Comunes de la Logística Inversa, se ven los diferentes tipos según el producto o material de empaque.

Por otro lado, se pueden clasificar los flujos de logística inversa atendiendo a la tipología de los productos; se puede hablar de productos al final de su vida útil, las devoluciones comerciales, las devoluciones por garantías, los desechos de producción y productos secundarios y los envases y embalajes. No obstante, es

importante resaltar que existen diferencias representativas entre los diferentes flujos inversos atendiendo a las posibilidades de gestión.

Tabla 1. Actividades comunes de la logística inversa

MATERIAL	ACTIVIDAD DE LOGISTICA INVERSA
Productos	Devolución al proveedor
	Reventa
	Venta vía outlet
	Salvamento
	Reparar
	Renovación/ Restauración
	Re manufactura
	Recuperación eficaz de materiales
	Reciclaje
	Relleno sanitario
Empaque	Reutilización
	Renovación/Mejoramiento
	Recuperación eficaz de materiales
	Reciclaje
	Salvamento

Fuente: Going Backwards: Reverse Logistics Trends and Practices, 2003

De manera general, el objetivo de esta cadena logística es recuperar la mayor cantidad posible de valor económico y de esta forma, poder reducir la cantidad final de residuos.

4.2 MARCO LEGAL

La gestión ambiental es un proceso dinámico y por tanto está en permanente ajuste, encontrándose un amplio marco jurídico para una adecuada gestión de los residuos sólidos, la cual en los últimos años ha seguido las directrices planteadas por la Política para la Gestión Integral de Residuos Sólidos y su Plan de Acción para su implementación.

Las políticas nacionales se vienen construyendo en armonía con los lineamientos internacionales. En Colombia desde hace más de 40 años se ha intentado orientar y dirigir el manejo de residuos sólidos a través de la legislación con la cual se pretende minimizar esta problemática que afecta principalmente al ambiente y en consecuencia a la sociedad. (IDEAM-UNICEF-CINARA, 2005)

Los antecedentes jurídicos del marco normativo de la gestión de residuos en Colombia, tiene su origen en el Código Sanitario Nacional - Ley 9 de 1979 y el Decreto-Ley 2811 de 1974, los cuales dividieron el tema entre la perspectivas sanitaria y las de carácter ambientales; posteriormente con la expedición de la Constitución Política de 1991 y de la Ley 99 de 1993 y de la Ley 142 de 1994 se ha establecido una amplia reglamentación que se agrupa en normas de carácter general y reglamentación específica asociada de las cual se extraen los elementos relevantes para el sector.

La Constitución Política de Colombia de 1991, estableció el derecho a un medio ambiente sano como derecho colectivo, como ya se mencionó fortaleció la descentralización, promovió la participación ciudadana y dio paso a la organización empresarial en los servicios públicos; aspecto que se desarrolla en la Ley 142 de 1994; la cual estableció el ordenamiento institucional para el sector, las condiciones para la creación de operadores del servicio, los indicadores de continuidad, calidad y cobertura, así como dio lugar al desarrollo del marco regulatorio. A continuación, en la **Tabla 2**, se relacionan los principales documentos de Política y el marco jurídico representado por las leyes, decretos y resoluciones que aplican al manejo de residuos sólidos, por lo tanto no se incluye los residuos hospitalarios y especiales.(Min-Vivienda, 2014)

Tabla 2. Normativa ambiental Colombiana vigente relacionada con la gestión de residuos sólidos

Residuos Sólidos - Generales	
Resolución MVCT 1045 de 2003	Esta resolución adopta la metodología para la elaboración de los Planes de Gestión Integral de Residuos Sólidos, PGIRS. Se encuentra en proceso de actualización como parte del Decreto 2981 de 2013.

Decreto 2981 de 2013	Establece el Programa para la Prestación del Servicio de Aseo y ajusta las actividades del servicio público de aseo en la Recolección, el Transporte, el Barrido, limpieza de vías y áreas públicas, Corte de césped, poda de árboles en las vías y áreas públicas, Transferencia, Tratamiento, Aprovechamiento, Disposición final, y Lavado de áreas públicas.
Disposición de Residuos Sólidos	
Decreto 838 de 2005	Establece los procedimientos para la planeación, construcción y operación de los sistemas de disposición final de residuos, con tecnología de relleno sanitario, como actividad complementaria del servicio público de aseo
Resolución 1390 del 2005. Resoluciones 1684 de 2008, 1822 de 2009, 1529 de 2010. Resolución 1890 de 2011	Establece directrices y pautas para el cierre, clausura y restauración o transformación técnica a rellenos sanitarios y se fortalecen medidas de control sobre formas no adecuadas de disposición final.
Decreto 2436 de 2008	Promueve la regionalización de los rellenos sanitarios y determino que las autoridades ambientales, las personas prestadoras del servicio público de aseo y de la actividad complementaria de disposición final de residuos sólidos o las entidades territoriales.

Fuente:(Min-Vivienda, 2014)

4.2.1 Leyes y Proyectos de Ley:

Dentro de las leyes y proyectos de ley referentes al tratamiento de residuos de baterías y pilas se encuentran los siguientes:

Ley 430 de 1998: Minimizar la generación de residuos peligrosos, diseñar estrategias para estabilizar la generación de residuos peligrosos. Reciclaje y reutilización de residuos y desechos. Adopción de tecnologías más limpias, ambientalmente sanas y seguras. El generador es responsable por los residuos que genere, y de disponerlos con el mínimo impacto ambiental. Obligación de realizar caracterización físico química de residuos.(Ojeda Burbano, 1997)

Proyecto de Ley N°69 – 2009, por el cual se establece la recompra de pilas, baterías eléctricas y basura electrónica por parte del fabricante y se dictan otras disposiciones.

4.2.2 Resoluciones:

Dentro del conjunto de resoluciones referentes al tratamiento de residuos sólidos, las relacionadas con el manejo de residuos de baterías y pilas son las siguientes:

Resolución 0372 del 26 de Febrero de 2009: Por la cual se establecen los elementos que deben contener los Planes de Gestión de Devolución de Productos Post consumo de Baterías Usadas Plomo Ácido, y se adoptan otras disposiciones.

Resolución 1297 del 8 de Julio de 2010: Por la cual se establecen los Sistemas de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Residuos de Pilas y/o Acumuladores y se adoptan otras disposiciones.

Resolución 619 de 1997: Establece la obligación de obtener permiso de emisión por parte de las industrias de fundición de plomo, independientemente de su tamaño.

Resolución 2309 de 1986: Responsabilidad por contaminación con residuos especiales (tóxicos) de autorización sanitaria para almacenamiento y tratamiento de residuos especiales. Obligación de registro ante la Secretaría de Salud.

Resolución 822 de 1998: Minimizar la generación de residuos peligrosos. Prevenir la contaminación de los recursos naturales.

4.2.3 Marco Legal Internacional

Dentro de la normativa mundial sobre el tratamiento de residuos especiales, entre ellos los residuos de las baterías se encuentran los siguientes documentos relevantes:

Ley N° 23.922 “Aprobación Convenio de Basilea sobre el control de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación”,

suscripto en Basilea, Suiza. El Convenio de Basilea sobre el control de los movimientos transfronterizos de desechos peligrosos y su eliminación es el acuerdo global del medio ambiente más completo en materia de desechos peligrosos y otros desechos. Tiene más de 170 Partes y su objetivo es proteger la salud humana y el medio ambiente contra los efectos adversos derivados de la generación, gestión, los movimientos transfronterizos y la eliminación de los desechos peligrosos y otros desechos. El Convenio de Basilea obliga a sus Partes a garantizar que esos desechos sean manejados y eliminados de una manera ambientalmente racional. (UNEP, 2010).

DIRECTIVA 2006/66/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO, del 6 de Septiembre de 2006 relativa a las pilas y acumuladores y a los residuos de pilas y acumuladores. La presente Directiva establece:

- 1) Las normas de puesta en el mercado de las pilas y acumuladores (baterías), y en particular la prohibición de poner en el mercado pilas y acumuladores (baterías) que contengan sustancias peligrosas.
- 2) Las normas específicas de recogida, tratamiento, reciclado y eliminación de los residuos de pilas y acumuladores (baterías) que completen la correspondiente legislación comunitaria en materia de residuos y fomenten un alto nivel de recogida y reciclado de residuos de pilas y acumuladores. La Directiva procura mejorar el rendimiento medioambiental de las pilas y acumuladores y de las actividades de todos los operadores económicos que participan en el ciclo de vida de las pilas y acumuladores, como los productores, los distribuidores y los usuarios finales, y en particular, de aquellos operadores que participan directamente en el tratamiento y reciclado de residuos de pilas y acumuladores. (Parlamento, 2006).

RESOLUCIÓN DEL CONSEJO NACIONAL DE MEDIO AMBIENTE DE BRASIL (CONAMA) N° 257, del 30 de Junio de 1999, sobre la regularización de la eliminación y la administración ambiental adecuada de las pilas y baterías usadas, en cuanto a la recolección, reutilización, reciclaje, tratamiento y disposición final.

En esta resolución se estableció que las baterías compradas en Brasil a partir de 1° de enero de 2001, deben atender a los límites establecidos en cuanto a su contenido químico. Estas baterías podrán ser dispuestas, juntamente con los residuos

domiciliarios, en vertederos sanitarios licenciados. También los otros tipos de baterías deben ser entregados por los usuarios a los establecimientos que las comercializan o a la red de asistencia técnica autorizada por los fabricantes e importadores de esos productos. Estos establecimientos están obligados a aceptar de los usuarios la devolución de las unidades usadas, cuyas características sean similares a las que son comercializadas.

Los fabricantes e importadores deberán identificar las baterías, mediante posición en los embalajes y, cuando quepa, en los productos, de símbolo que permita al usuario distinguirlos de los demás tipos de pilas y baterías comercializados. De un modo general, las baterías de níquel-cadmio (Ni-Cd) no deben ser desechadas en la basura común pero sí entregadas a un puesto de descarte. Las baterías de níquel-metal-hidruro (Ni-MH) y litio-ion (Li-Ion) pueden ser desechadas en la basura. (Teleco, 2915).

4.3 BATERIAS Y PILAS

Las pilas en general se componen de celdas electrolíticas en las que dos placas eléctricas de metales distintos (cátodo y ánodo) están separadas entre sí por una solución iónica que es el medio capaz de conducir electrones entre ambas placas. Estos elementos están contenidos en un envase o recipiente metálico o plástico, con separadores de los elementos activos como papel o cartón, auxiliares constructivos como plomo o cadmio que mejoran la embutición o mercurio que limita la corrosión, además de elementos de presentación comercial. (Zapata & Gonzalez, 2007)

Por otra parte un acumulador o batería, es un conjunto de dos o más pilas (celdas), conectadas en serie o paralelo, capaces de almacenar energía química y transformarla en energía eléctrica. La Comisión Electrotécnica Internacional (IEC) ha decidido al respecto que oficialmente el término batería incluye también celdas solas si tienen arreglos finales tanto que puedan ser colocados en un compartimiento de batería y proporcionar el contacto adecuado; además la celda sola debe contener las especificaciones requeridas por el estándar del IEC para ser llamada batería. (Ortez & Parada, 2008).

Existen diferentes tipos de baterías y pilas, las cuales se clasifican según su composición, debido a que la proporción y tipo de sustancia química que contiene,

está relacionada con el uso que se le va a dar. Se conocen como pilas primarias aquellas que son desechables ya que sus componentes químicos al convertirse en energía eléctrica ya no pueden recuperarse, y secundarias a las recargables, ya que se pueden seguir usando invirtiendo su reacción química. En la **Tabla 3** y **4** se ilustra los tipos de baterías y pilas según su composición química y su grado de toxicidad.

Tabla 3. Clasificación de pilas primarias según su composición química

Tipo de Pila	Características toxicas	Usos	Toxicidad
Primarias			
Secas o Carbón-Zinc	Contienen muy poco mercurio (0.01%)	Linternas, radios, juguetes. La mayoría de manufactura asiática.	Muy Baja
Alcalinas	Tienen un porcentaje de mercurio de 0.5%	Juguetes, tocacintas, cámaras fotográficas, grabadoras. Duran el triple que las secas.	Toxica
Botón Oxido de Mercurio	Algunas contienen hasta 30% de mercurio y litio	Aparatos de sordera, calculadoras, relojes e instrumentos de precisión.	Muy Alta
Litio	Litio de 10 a 30%	Equipo de comunicación, radios portátiles, transmisores, instrumentos médicos, computadoras, celulares, etc.	Muy Alta
Verdes	Carecen de cadmio y mercurio, aunque se desconocen parte de sus componentes, contiene alcohol.		Desconocida

Fuente:(Jacott, 2004)

Tabla 4. Clasificación de pilas secundarias según su composición química

Tipo de Pila	Características toxicas	Usos	Toxicidad
Secundarias			
Recargables	Contienen cadmio, plomo y níquel. No contienen mercurio.	Una pila recargable puede sustituir 300 desechables.	Toxicas
	Níquel-Cadmio 18%	Juguetes, lámparas, equipo electrónico portátil, teléfonos inalámbricos. Pueden durar 500 veces más que una pila de Carbón-Zinc.	

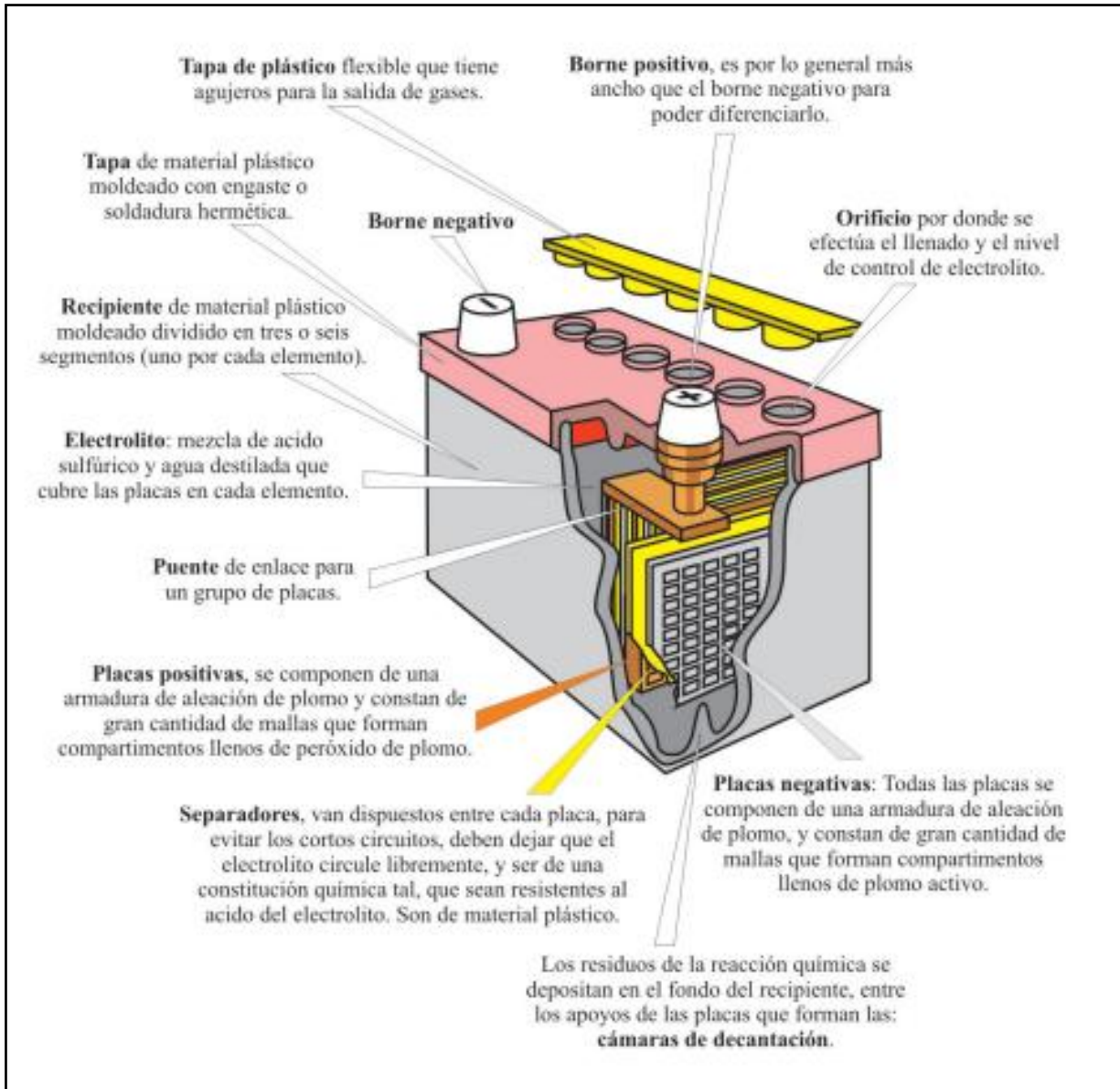
	Níquel-Metal-Hidruro 25%	Productos electrónicos portátiles.
	Ion-Litio	Telefonía celular, computadores, cámaras fotográficas y de video.
	Plomo-Acido	Uso automotriz, industrial y doméstico.

Fuente: (Jacott, 2004)

Como se mencionó las pilas y baterías secundarias son las que mayor porcentaje de aprovechamiento tienen al final de su vida útil, debido a que sus componentes incluyendo los compuestos químicos son posibles de reciclar incluso después de haber pasado por una reacción química al generar energía. Entre ellas la batería Plomo-Acido, se caracteriza por ser la que tiene mayor número de componentes posibles de recuperar, los cuales tienen valor en el mercado.

En la **Grafica 2**, se puede ver la composición de una batería Plomo-Acido. La conforman las rejillas, que son un armazón que sirve de soporte para los materiales activos y conducen la corriente. Las placas compuestas por rejillas impregnadas de material activo (mezcla de óxido de plomo y otros químicos). Los separadores quienes impiden el contacto metálico entre las placas de polaridad opuesta. El electrolito que sirve como medio conductor de energía, entre los componentes internos de la batería. La caja de la batería, es el recipiente que contiene el electrolito y elementos conductores de corriente, fabricada en polipropileno. El tapón o respiradero que libera hidrogeno durante la carga, y los accesorios complementarios compuestos por conectores de plomo, conjunto de placas, positivas y negativas, caja, cubierta y tapones de seguridad.(Lozano, Mesa, & Restrepo, 2006)

Gráfico 2. Composición física de una batería



Fuente: Manual de buenas prácticas para el manejo de baterías usadas de plomo ácido (Moreno Rojas, 2008)

Con el paso del tiempo, la batería no puede cargarse nuevamente, se produce su agotamiento, debido a la gran acumulación de sulfato de plomo en las placas durante la descarga. Esto trae como consecuencia que no se produzcan las reacciones

químicas de recarga. En este momento la batería se convierte en un residuo.(Moreno Rojas, 2008)

Las pilas y baterías usadas y agotadas, provenientes mayormente del uso de distintos artefactos: juguetes, electrodomésticos pequeños, equipos de música, relojes, computadoras, etc., forman parte de la generación habitual de residuos domésticos o domiciliarios. Sin embargo, las baterías y algunas clases de pilas contienen compuestos con características de peligrosidad que, en el caso de ser dispuestas incorrectamente una vez agotadas, podrían afectar negativamente al ambiente, incluidos los seres vivos, y como tal deben disponerse de una forma diferente a los demás residuos. (Álvares, 2011)

4.3.1 Residuos de Baterías y Pilas

De acuerdo con los resultados de un estudio realizado por investigadores de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional con el apoyo del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, en Colombia se consumen en promedio 210 millones de unidades anuales de pilas, de las cuales el 57% corresponde a pilas primarias de zinc-carbón y el 35% a primarias cilíndricas alcalinas. Las pilas y baterías contienen elementos químicos tóxicos; de hecho, el 30 % de su contenido son materiales que causan daños a la salud y el medio ambiente. Con el paso del tiempo y por descomposición, sus elementos se oxidan y derraman diferentes tóxicos en el suelo, agua y aire. Lo mismo sucede cuando se quema en basureros o se incinera.(Álvares, 2011)

La batería gastada, debido a su contenido de plomo y ácido sulfúrico, se ha convertido en un residuo peligroso y no puede descartarse como cualquier residuo domiciliario. Por otra parte, una batería de plomo-ácido es un producto cuyos materiales pueden ser reciclados en su totalidad. La batería de plomo fuera de uso está catalogada como residuo especial y como tal, debe ser gestionada según los procedimientos especificados en las leyes relativas a residuos. Cabe recordar que una sola batería de plomo fuera de uso contiene unos 10 Kg. de contenido en plomo, cerca de dos kilos de disolución de ácido sulfúrico y una cantidad considerable de plásticos contaminantes, por lo que el daño ecológico que una pequeña cantidad de baterías mal gestionada puede provocar es enorme.(Tope, 2013). En la siguiente

tabla se muestran las diferentes sustancias toxicas y su relación con los daños a la salud y el medio ambiente.

Tabla 5. Impactos de las sustancias toxicas en la salud y el medio ambiente

Sustancia	Daños a la Salud	Daños al Medio Ambiente
Mercurio	Posible cancerígeno, daños al cerebro, riñones, provocando retraso mental, falta de coordinación, ceguera y convulsiones.	Contaminación de aguas y suelos, a causa de depósitos naturales, también es bioacumulable, es decir que se acumula en los tejidos de los peces.
Cadmio	Lesiones en pulmones y riñones, irritación del estómago, provoca vómito y diarrea. Sus componentes son carcinogénicos y pueden provocar la muerte.	Contaminación del aire a través de la quema de carbón y desechos domésticos, provenientes de la minería y la industria. Contaminación de suelos y aguas por derrames escapes en sitios de desechos peligrosos.
Níquel	Daños en la piel, bronquitis crónica, cáncer de pulmón y senos nasales.	Contaminación del aire por quema de carbón, petróleo y basura. Efectos negativos en los suelos por el vertimiento de desagües industriales.
Litio	Neurotóxico y tóxico para el riñón. Intoxicación por litio produce fallas respiratorias, depresión del miocardio, edema pulmonar y estupor profundo. Daño al sistema nervioso, llegando a estado de coma e incluso la muerte.	El litio puede lixivarse fácilmente a los mantos acuíferos, se ha encontrado en pequeñas cantidades en diferentes especies de peces. El litio no es volátil por lo que pueden regresar a la superficie a través de deposición húmeda o seca.
Plomo	Daños al sistema nervioso, riñones y sistema reproductivo.	El plomo no se degrada. Compuestos de plomo son transformados por la luz solar, el aire y el agua. Cuando se libera al aire puede ser transportado largas distancias antes de sedimentar. Se adhiere al suelo. Su paso a aguas subterráneas depende del tipo de compuesto y de las características del suelo.

A todos estos contaminantes tendríamos que mencionar que existen otros como los retardantes de fuego bromados que se encuentran en las pilas y baterías de celulares, computadoras y otros aparatos eléctricos y electrónicos. Por ejemplo, en 2004, se utilizaron cerca de mil toneladas de retardantes de fuego bromados en la fabricación de 674 millones de teléfonos celulares. Este químico se bioacumula, es neurotóxico y puede deteriorar las funciones de aprendizaje y memoria, interfiere con las hormonas tiroidea y estrógeno y la exposición en la gestación puede relacionarse con problemas de comportamiento.(Córdoba, 2014).

La recuperación de productos fuera de uso busca básicamente reducir el impacto sobre el medio ambiente mediante la implementación de actividades como la reutilización, reciclaje u otro tipo de valoración del producto, reducir el consumo energético e hídrico dentro de los procesos productivos, reducir las materias vírgenes extraídas y las cantidades de residuos que son enviadas a los vertederos. De esta manera, serán necesarios cambios en los procesos de investigación y desarrollo para incorporar nuevas especificaciones en los productos y hacerlos más eco-eficientes. El Diseño ecológico debe ir ligado a políticas de reducción y de reutilización. Hoy en día es importante tener la tecnología al alcance, es así como cada vez se busca en el mercado aparatos electrónicos más pequeños y más baratos y con una tecnología más avanzada.

4.3.2 Panorama Global de los Residuos de Baterías y Pilas

A continuación se encuentran los países en los que la recuperación y aprovechamiento de residuos de baterías fuera de uso, tiene gran relevancia y actualmente son caso de estudio, para la formulación de sistemas de logística inversa efectivos en la gestión de residuos.

En México: Se estima que entre 1995 y 2003 se generaron 35,500 toneladas anuales de residuos de pilas y baterías. Más de 500 millones de baterías de importación legal se consumieron en 1997. (Misma cantidad usada como referencia de consumo por año). Más de 300 millones de baterías de origen ilegal se consumieron en ese mismo año.

Cada año se consumen 75 toneladas de baterías de telefonía inalámbrica; 18% de su contenido es cadmio (13.5 toneladas) y 20 % níquel (15 toneladas) lo que nos da

una cantidad aproximada de 28.5 toneladas anuales de residuos peligrosos sólo para telefonía inalámbrica.

En 43 años (1960-2003) se han liberado en México, aproximadamente 635 mil toneladas de pilas; 30% de este total, o sea más de 190mil toneladas corresponde a sustancias tóxicas y a esta cifra se deben añadir las pilas que ilegalmente entran en el país y las que ya incluyen muchos aparatos y pilas de botón en relojes.

El alto volumen de tóxicos generado por las pilas primarias “menos dañinas” (dióxido de manganeso) podría representar un problema ambiental y de salud pública tan grave como el ocasionado por contaminantes más peligrosos como níquel, cadmio o mercurio.

En Estados Unidos: Aproximadamente 50% de las 1800 toneladas de cadmio que ingresaron en la corriente de basura en 1986, provenían de baterías. En 1983, 753 toneladas de mercurio se utilizaron para producir baterías domésticas y en 1989, los fabricantes de baterías utilizaron 130 toneladas de mercurio, 80% menos que seis años antes.

En Estados Unidos, las baterías recogidas se envían a instalaciones de reciclaje donde se recuperan los materiales valiosos y se separan los tóxicos.

Más de 4.6 millones de toneladas de basura electrónica terminaron en el 2000 en confinamientos de este país. El origen del 35% de la contaminación por mercurio es la incineración de baterías en la basura doméstica.

En Estados Unidos se consumen alrededor de 3 billones de baterías secas para radios, juguetes, relojes, computadoras y herramientas cada año.

Por su parte, la **Unión Europea** cuenta con una directiva sobre pilas y acumuladores; su objetivo es dotar a los Estados miembros de una normatividad similar en materia de reciclado y eliminación controlada de pilas y acumuladores usados limitando la cantidad de mercurio y de metales pesados; garantizar la recolección selectiva; y evitar que sigan arrojándose en vertederos o incinerándose, en vez de ser recogidos y reciclados. (Jacott, 2004)

En Argentina: en la Universidad Nacional de San Martín, estudiantes pusieron en marcha a nivel comunitario, el reciclaje de baterías que no contienen mercurio, mediante bacterias comedoras de azufre, que, además, se complementa con una técnica que utiliza plantas capaces de capturar el zinc. Según Gustavo Curutchet,

biotecnología de la Universidad Nacional de San Martín, el agente bacteriano *Acidithiobacillus thiooxidans*, fue aislado del Río Agrio, en las termas de Copahue, donde se alimenta de azufre. En el reactor bacteriano experimental, se alimenta a la bacteria con azufre para que lo transforme en ácido sulfúrico y otros productos llamados politionatos. "Las pilas alcalinas usadas se sumergen simplemente en ese caldo de ácido sulfúrico que las disuelve por completo; después, mediante electrólisis, se aíslan y recuperan los metales que las constituyen, que eventualmente pueden reutilizarse y en todo caso no pasan al medio ambiente. (Zapata & Gonzalez, 2007).

4.4 RECICLAJE DE RESIDUOS DE BATERIAS FUERA DE USO.

El reciclaje de las baterías fuera de uso se realiza principalmente por tres razones. La primera va ligada con el concepto de sostenibilidad y responsabilidad ambiental, la protección del medio ambiente hace parte de los intereses generales de todo el mundo. La segunda razón, es el atractivo económico de esta práctica, debido a que se evidencia un ahorro considerable de costos en la extracción de materias primas vírgenes. Además de esto existe la posibilidad de generar materias primas de calidad, que tiene valor comercial, y puede ser utilizada para otros procesos en especial plomo de 99.99% de pureza refinado por método electrolítico, plástico paletizado y solución de ácido sulfúrico, para la fabricación de sales inorgánicas.

Se define reciclaje al proceso que reintegra al ciclo de consumo, los materiales presentes en los residuos sólidos que ya fueron desechados y que son aptos para elaborar otro tipo de productos. (SEDESOL, 1997). El reciclaje de materiales recuperables a partir de los residuos sólidos es un método compuesto de tratamiento y de disposición final de los materiales existentes en los desechos. Este proceso tiene cada vez más aceptación e importancia en el mundo por sus ventajas económicas, ecológicas, sociales y sanitarias al ser un complemento de los demás métodos convencionales de manejo de residuos sólidos.

El reciclaje parece tener grandes ventajas o al menos la salida para reducir y valorizar los desechos. No quiere decir que se reduzca el consumo de materias primas con una demanda creciente, pero si se ahorrarán o se consumirán de una manera más lenta, lo que permitirá el desarrollo de saltos tecnológicos en el futuro

que solucionen el problema. Sin embargo como se muestra en la **Tabla 6.** existen también algunas desventajas del reciclaje, pero cuando se comparan con los beneficios obtenidos, estas desventajas son mínimas.(SEDESOL, 1997).

Tabla 6. Ventajas y desventajas del reciclaje

RECICLAJE	
VENTAJAS	DESVENTAJAS
• Se reduce el volumen de los residuos sólidos urbanos que debe ser recolectado, transportado, tratado y dispuesto en forma conveniente. • Se alarga la vida de los rellenos sanitarios. • Hay un ahorro para el ayuntamiento en gasolina y gastos de operación y mantenimiento de los equipos recolectores. • Permite ahorros muy importantes de recursos naturales, agua y energía. • Contribuye a la conservación y protección de los recursos naturales y el ambiente. • Genera empleos en el acopio y reciclaje	• Baja participación ciudadana. • Sujeta a la variación del mercado de los subproductos. • Las inversiones no siempre son rentables aunque se tengan beneficios

Fuente:(SEDESOL, 1997)

Existen varios tipos de reciclaje, debido a que la elección más adecuada del método de reciclaje, depende de factores como la composición del material, la legislación ambiental vigente, los incentivos monetarios de las autoridades gubernamentales, densidad de población, precio de materias primas vírgenes, etc. Los más comunes en Colombia son el reciclaje primario y reciclaje secundario o reciclaje mecánico.

El reciclaje primario o (ciclo cerrado), es generalmente el más deseable, debido a que en éste, se reciclan productos para producir otros productos nuevos del mismo

tipo, es decir, se recicla papel periódico y aluminio, para fabricar productos cuya materia prima sean papel periódico y aluminio.

El reciclaje secundario o mecánico, consiste en la recuperación del material para su uso, bien sea en la forma original (reciclaje primario), o bien sea en otra menos exigente. Actualmente es el tipo de reciclaje más común en Colombia, aunque para algunas empresas, es menos deseable que el primario debido a que la reducción en el uso de recursos es menor que en el primario, además no se está reciclando realmente, se están haciendo otros productos que en un tiempo dado serán desecho y no se ahorra en la fuente donde se generó su uso del material que se quiere reciclar.(Boada Ortiz, 2003).

Por otra parte existe el reciclaje químico, el cual aplica solamente a los materiales termoplásticos logrados por poli-condensación. Se basa en aprovechar la reversibilidad de la reacción, re obteniéndose los monómeros iniciales. Y por último el reciclaje cuaternario o incineración, en el cual los residuos se convierten en energía.

En el caso del reciclaje de baterías fuera de uso en Colombia, generalmente se utiliza el reciclaje mecánico, compuesto por diferentes pasos como se muestra en la figura. Actualmente se considera el uso de tecnologías medianamente avanzadas, para los procesos de recuperación, como la separación por densidad y la recuperación de plomo por reducción térmica en el horno rotatorio.

El proceso inicia con la descarga de las baterías. Después en una primera unidad de separación de componentes se extrae el ácido sulfúrico del electrolito y, a continuación, se trituran las baterías usadas para proceder a la clasificación de materiales. De entre estos materiales, se separa el polipropileno, que se recicla en la misma planta, o se vende a otras industrias que se encargan de su reciclaje. Por otro lado se separan la pasta de plomo, el plomo metálico y sus aleaciones y, finalmente, se depositan los denominados residuos del triturado, entre los que se encuentran fracciones de vidrio, acero, PVC, y ebonita principalmente. El funcionamiento de la unidad de triturado y clasificación se basa en el resultado de sucesivas separaciones hidrodinámicas, mediante las cuales se procede con eficiencia al aislamiento de los distintos materiales. Tras la separación de componentes se llevan a cabo las operaciones de recuperación del plomo. La inmensa mayoría de las plantas de

reciclaje de baterías usadas son fundiciones de plomo secundario que emplean métodos piro metalúrgicos tradicionales.(Tope, 2013)

Es muy importante conocer el tipo de producto que se va a recuperar y aprovechar debido a que cualquier red de logística inversa está fuertemente ligada al tipo de producto o residuo recuperado. Esto influye directamente en los métodos de recuperación transporte y almacenamiento.

Como se menciona existen diferentes tipos de residuos, por lo tanto existen múltiples maneras de administrar en proceso de recuperación y esto difiere entre regiones geográficas y administraciones gubernamentales locales, lo que condiciona al proyecto a cumplir con las respectivas normas y leyes respecto a la manipulación, transporte, almacenamiento y disposición final de residuos según su tipología. Esta información es una de las entradas del proceso de formulación del modelo de logística inversa a tratar y se complementa con la identificación de los factores relevantes que inciden en la logística inversa.

5. FACTORES RELEVANTES QUE INCIDEN EN LA APLICACIÓN DEL FLUJO INVERSO EN LA CADENA DE SUMINISTRO DE LAS BATERÍAS DE PLOMO ÁCIDO

Con el fin de dar cumplimiento al primer objetivo específico en el cual se identifican los factores relevantes que inciden en la aplicación del flujo inverso de la logística, se muestra a continuación un análisis de la literatura en el cual se resaltan varios factores importantes tales como el impacto medioambiental, la recolección, transporte y acopio de los residuos, la oferta de residuos, entre otros, que hay que tener en cuenta en el momento de desarrollar un proyecto de esta índole.

Durante el ciclo de vida de las baterías, se generan efectos negativos en el medio ambiente como resultado de los procesos realizados en cada eslabón, desde la extracción de materia prima, pasando por su fabricación y transporte, luego en manos del cliente y por último su recuperación y disposición final. Es muy importante conocer los efectos negativos que impactan el medio ambiente para así enfocar y tomar medidas para minimizar el deterioro ambiental.

En la etapa de pre- producción (extracción de materias primas), hay una intervención en el paisaje, como resultado se obtiene destrucción del ecosistema, contaminación de aguas subterráneas, pérdida de fertilidad en los suelos, entre otros problemas ecológicos. Posteriormente en la etapa de producción, distribución y venta, como resultado de los procesos se tiene el aumento de los residuos no recuperables, contaminación del agua, emisión a la atmósfera de gases, agotamiento de la capa de ozono, efectos eco tóxicos (plomo y metales pesados) en la fauna, flora y humanos.

Una vez en manos del cliente, en la etapa de uso, se obtiene un impacto en la salud, debido a la radiación producida por emisiones desde los tubos de rayos catódicos. Por último en la gestión al final del ciclo de vida útil, se generan desechos tóxicos, lixiviados que contaminan las aguas subterráneas, e impacto en la capa de ozono producto de las incineraciones y fugas.

El reciclaje es también una etapa importante para la gestión de residuos de baterías tanto económica como ambiental. Los beneficios ambientales se pueden evidenciar en el ahorro de energía obtenido al reciclar material, comparado con la energía.

En la mayoría de los casos, las actividades que habitualmente se emplean para la valorización y aprovechamiento de los residuos de baterías fuera de uso son las

siguientes: Recolección, selección y clasificación, proceso de recuperación, procesado y transformación de los materiales recuperados y eliminación. Cabe anotar que así como existen impactos negativos en el medio ambiente a través del ciclo de vida de las baterías en el flujo directo, también hay incidencia negativa en el ambiente al realizar algunas actividades de gestión de residuos.

En las etapas de recuperación y transporte, se genera contaminación del aire por arrastre de ácido sulfúrico durante la evaporación del agua. También se ve afectada el agua y los suelos, debido a la pérdida de electrolito. La salud humana se ve en riesgo de posibles quemaduras con ácido sulfúrico y el paisaje se ve afectado debido a las actividades de cargue y descargue de baterías usadas.(OCADE, SANIPLAN, & AMBIENTAL SA, 2000)

En la **Tabla 7** se muestra la matriz de valoración indicativa que propone (Murillo, 2009) en la cual se muestra el nivel de incidencia negativa, que trae cada eslabón del ciclo de vida de las baterías, en el medio ambiente. Se califica en una escala de uno a cinco, de tal manera que:

- 1: Alto impacto para el medio ambiente
- 2: Entre alto impacto y medio impacto para el medio ambiente
- 3: Medio impacto para el medio ambiente
- 4: Entre medio impacto y bajo impacto para el medio ambiente
- 5: Bajo impacto para en el medio ambiente

Tabla 7. Matriz de valoración del impacto ambiental a lo largo de la vida útil de las baterías

Matriz de valoración Indicativa						
Impacto	Pre-Producción	Producción	Distribución	Utilización	Disposición Final	Total
Suelo	3	1	3	2	1	2
Agua	3	1	3	1	1	1.8
Aire	3	2	2	2	2	2.2
Ruido	4	3	2	2	3	2.8
Consumo de energía	1	1	1	1	1	1
Consumo de recursos naturales	2	1	3	3	2	2.2

Ecosistema	2	1	3	1	1	1.6
-------------------	---	---	---	---	---	-----

Fuente: (Murillo, 2009)

Teniendo en cuenta lo anterior, es muy importante tener clara la forma como se debe recolectar, recuperar y aprovechar los residuos generados por las baterías en el norte del Valle. En los procesos de selección y clasificación, es necesario capacitar a los trabajadores, contar con el número y capacidad de las instalaciones que faciliten la inspección y clasificación. En el proceso de recuperación es muy importante contar con tecnologías adecuadas, planes de producción a largo plazo. En la distribución se debe crear canales de distribución y mercados de destino y en el proceso de eliminación es necesario determinar el destino de los residuos no recuperables y los sistemas de eliminación.

5.1 RECOLECCIÓN

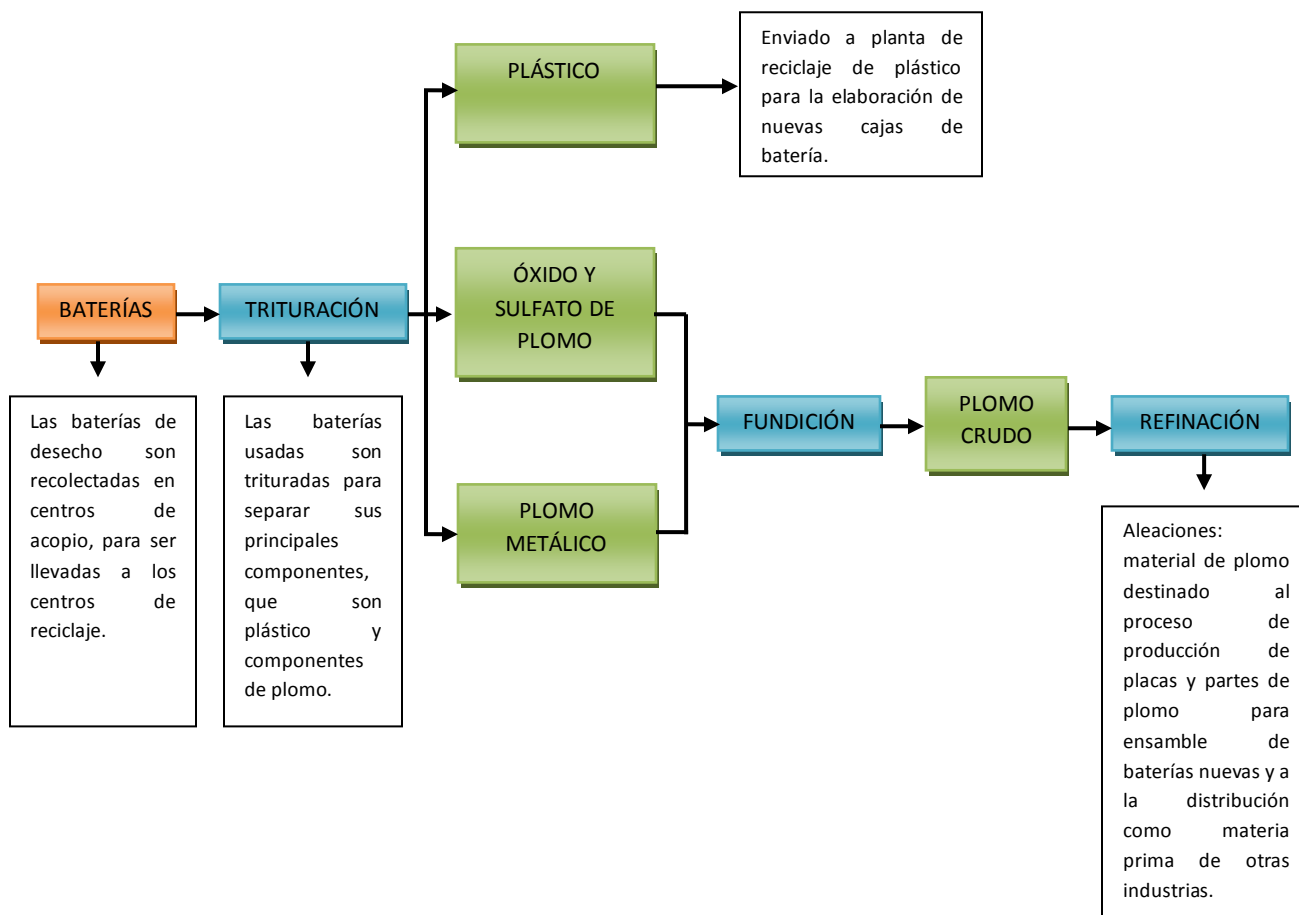
El proceso de recolección de las baterías fuera de uso, se inicia en el momento en el que el usuario la desecha. Para abordar este proceso, es necesario haber diseñado previamente la forma o medio de recolección a través de personas capacitadas para esta labor y contar con los medios de transporte adecuados que lleven los residuos a centros de acopio especificados con anterioridad. Es importante contar con rutas de recogida que se encarguen de la recepción de estos productos fuera de uso en los diferentes sectores, industria, entidades públicas, privadas y hogares.(Lozano et al., 2006).

5.2 RECUPERACIÓN

Para recuperar, refabricar o reciclar es necesario contar con tecnología apropiada que permita recuperar equipos o piezas que todavía pueden ser utilizadas. Las diferentes partes que no son reutilizables, recuperables o que sus materiales no cumplen con las condiciones mínimas para ser recicladas, previamente se debe contar con sistema de eliminación que permita transportar, manipular y enviar todos los residuos a un destino que cumpla con todas las especificaciones sanitarias para recibir este material sin que afecte el medio ambiente ni la salud de las personas.(Valencia, 2005).

5.3 APROVECHAMIENTO

Gráfico 3. Proceso de aprovechamiento de las baterías fuera de uso



Fuente: Adaptado de manual de buenas prácticas para el manejo de baterías usadas de plomo ácido. (Moreno Rojas, 2008)

En el proceso de aprovechamiento las baterías usadas son transformadas para obtener la materia prima necesaria que permite la producción de nuevas baterías. En el esquema anterior se puede visualizar dicho proceso.

Como se muestra en la **Tabla 8**, en Colombia la industria del aprovechamiento de baterías usadas opera a diversos niveles tecnológicos y, por tanto, con diversos grados de afectación ambiental. Por otra parte existe un marcado contraste

socioeconómico, en el que los recicladores de menor escala compiten con los grandes productores, formalmente establecidos, vía reducción de costos productivos. Dicha reducción de costos implica un alto grado de informalidad en los procesos productivos relacionados.

El diseño para el reciclaje pretende maximizar el beneficio durante la vida útil del producto, incrementando las partes aprovechables a la vez que se reducen los desechos en vertederos. Las consideraciones sobre el impacto ambiental de la eliminación y reciclaje de los productos, al finalizar su vida útil, dan lugar a un cambio en el diseño y los procesos de fabricación utilizados. Lo anterior debe ir ligado a las estrategias de reciclaje (figura) las cuales deben ir orientadas a la maximización de beneficios, por eso se escoge la más favorable. Generalmente se recomienda comenzar con la minimización, reutilización y reacondicionamiento, reciclaje, recuperación de energía y disposición final.(Hernandez Pahceco, 2013)

Tabla 8. Impactos negativos del proceso de aprovechamiento de baterías según el tipo de tecnología

Impactos sobre la salud y el ambiente	APROVECHAMIENTO		
	BAJA TECNOLOGIA	TECNOLOGIA INTERMEDIA	ALTA TECNOLOGIA
AIRE	Contaminación por emisiones de plomo		Contaminación por emisiones de plomo
AGUA	Contaminación por deposición de emisiones de partículas de plomo, descarga de escoria y descarga de electrolito.		Contaminación por deposición de emisiones de partículas de plomo y por descargas de electrolito. (Eventual)
SUELO	Contaminación por deposición de emisiones de partículas de plomo, descarga de escoria y evaporación de electrolito.		Contaminación por deposición de emisiones de partículas de plomo y por descargas de escoria. (Eventual)
SALUD	Por la presencia de compuestos de plomo, la introducción de plomo en la cadena alimenticia y por la presencia de ácido en el ambiente.		Por la presencia de compuestos de plomo y por la introducción de plomo en la cadena alimenticia.
PAISAJE	Contaminación visual por presencia de humos de fundición.		No hay Contaminación

BIOTICO	Afecta especies tanto de flora como fauna por la emisión de plomo y vapores de electrolitos.	Afecta especies tanto de flora como fauna por la emisión de plomo y vapores de electrolitos.
----------------	--	--

Fuente:(OCADE et al., 2000)

El reciclaje es una solución, ya que aparte de reducir cualquier material, pueden salvarse grandes cantidades de recursos naturales no renovables, disminuyendo el consumo de energía al usar menos combustible y por ende genera menor cantidad de dióxido de carbono evitando la lluvia ácida y el efecto invernadero.

Actualmente el impedimento del reciclaje a gran escala, es la recogida insuficiente de baterías fuera de uso. Por lo tanto para asegurar un proceso de recolección exitoso, tanto el transporte y la manipulación, como la clasificación y el almacenamiento son factores clave que se deben tener en cuenta para aumentar el porcentaje de recuperación. Dicho esto el recuperador deberá asegurar que se mantienen las condiciones técnicas de manipulación y almacenado adecuadas para la buena conservación y mantenimiento del producto retornado. Distribuidor y proveedor acordarán las condiciones de transportes de los productos a retornar, mientras que fabricantes y clientes aplicarán el tratamiento adecuado al producto recuperado y éste se ajustará a sus políticas y procedimientos internos o, en su defecto, seguirá las normativas legales establecidas.(Aecoc, 2013)

Reciclaje de plomo, es el aprovechamiento del plomo de las baterías usadas, y consiste en el proceso mediante el cual se dispone de las baterías como un insumo para transformación, empezando por la recolección y acopio, luego la obtención del plomo en bruto para trabajarlo, con un conjunto de materiales, herramientas, infraestructura, trabajo, conocimiento y energía, para obtener un producto final o intermedio, tal como lingotes de plomo, placas o bornes, o la batería nueva o reconstruida. (Aguilar, 2002)

5.4 CUANTIFICACIÓN DE LOS RESIDUOS PROVENIENTES DE BATERÍAS FUERA DE USO EN LA REGIÓN

Actualmente no existen estudios o proyectos orientados a descubrir la cantidad de baterías fuera de uso a ser recuperadas y recicladas en ciertos municipios del centro

y norte del Valle de Cauca. Sin embargo es posible hacerlo, al inferir en el sector tomando como base datos estadísticos históricos y algunas investigaciones que se han realizado referentes al tema en otras ciudades de Colombia.

Según el ministerio de transporte, en el año 2014, Colombia contaba con un parque automotor estimado en 10.937.607 vehículos, de entre los cuales el 90.17% pertenece al sector privado, el 8.51% al sector público y el 1.33% restante corresponde al sector oficial. Para poder calcular el número de baterías fuera de uso generadas al año, se utiliza el I_{GB} (Índice de generación de baterías), resultado de la investigación realizada por la Unión Temporal OCADE LTDA CONTROL AMBIENTAL Y DESARROLLO EMPRESARIAL, de Colombia, SANIPLAN, de Brasil y AMBIENTAL S.A., de Argentina, en el año 2000. En esta investigación se crea el I_{GB} con el fin de determinar la cantidad de baterías susceptibles de recuperar por tipo de vehículo, a través de una caracterización del sector en donde se tiene en cuenta los hábitos del usuario en cuanto a periodicidad del cambio de las baterías, sitios de cambio entre otras características que motivan realizar el reemplazo.

Se tiene entonces que para finales del año 2014, la cantidad de baterías posibles a recuperar es aproximadamente 6.234.968 unidades, lo que equivale a 99.759 toneladas de residuos especiales provenientes del parque automotor nacional. El peso promedio de una batería es de 16 Kg, de los cuales el 75% de este peso corresponde al contenido de plomo, se puede decir entonces que la oferta anual de plomo para reciclar es de 74.819,62 toneladas como se muestra en la **Tabla 9**. El sector con mayor participación en la generación de baterías fuera de uso es el sector privado con 88.82% del total de baterías generadas, seguido por el sector público (9.79%) y por último el sector oficial con 1.39% de participación.

5.5 OFERTA DE RESIDUOS DE BATERÍAS DE PLOMO ÁCIDO

La Unión Temporal OCADE LTDA CONTROL AMBIENTAL Y DESARROLLO EMPRESARIAL, de Colombia, SANIPLAN, de Brasil y AMBIENTAL S.A., de Argentina; en cumplimiento de los compromisos adquiridos con el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), a través del contrato No. 9992041, desarrolló el proyecto "Diagnóstico ambiental sobre las baterías usadas generadas por el mantenimiento del parque automotor de la ciudad de Santa Fe de Bogotá".

Este proyecto tuvo como finalidad establecer las condiciones que determinan el manejo actual de las baterías usadas generadas por el Parque Automotor de Santa Fe de Bogotá, estudiar las diferentes alternativas que para nuestro medio se plantean como una solución a los problemas encontrados, seleccionar y estudiar la mejor opción a implementarse de acuerdo a las experiencias internacionales evaluadas, acordes con la realidad nacional, y especificar las actividades, programas y acciones que se recomiendan desarrollar para dar viabilidad a la solución estudiada.

Por otra parte se encuentra el caso de la empresa MAC S.A, una de las grandes productoras de baterías nuevas en el país, que dispone de una red de 55 puntos de recolección (energéticas), que a su vez son los puntos directos de distribución de las baterías de su marca, en estos centros los clientes dejan las unidades usadas que la empresa acopia en bodegas industriales antes de ser recogidas por camiones que las llevan hasta la planta de reciclaje en Cali. También se cuenta con una red de contratistas que recogen y suministran baterías de desecho a la empresa.

En el año 2000 se firmó un convenio entre MAC S. A. y la Asociación Nacional de Recicladores (Arreciclar), apoyado con recursos económicos de la Organización No Gubernamental Nobiv de Holanda y cuya prueba piloto se desarrolla en Barranquilla. Con el convenio se pretende acopiar en bodegas predefinidas, baterías usadas que se generan y se recolectan por fuera de los límites de operación de la empresa interesada, a través de los recicladores organizados en cooperativas, afiliados y coordinados por Arreciclar. No obstante, no se conoce el resultado de la prueba piloto en términos de su efectividad, impacto socioeconómico y ambiental y, si realmente permite consolidar un sistema de recolección autónomo privado.

Tabla 9. Distribución del peso de las baterías fuera de uso en Colombia por tipo de residuo

SECTOR	BFU/Año	Peso (TON)	Distribución por tipo de residuo		
			Plomo	Polipropileno	Otros residuos (Metales, separadores, electrolito)
			(75% del peso)	(5% del peso)	(20% del peso)
PUBLICO	610376	9766.01	7324.51	488.30	1953.20

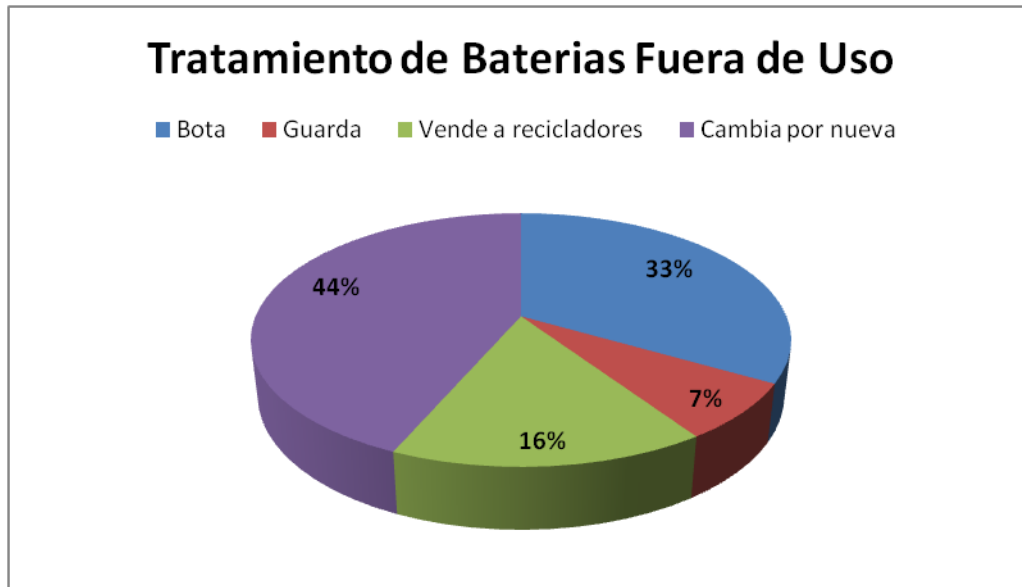
PRIVADO	5538189	88611.02	66458.27	4430.55	17722.20
OFICIAL	86404	1382.46	1036.85	69.12	276.49
TOTAL	6234968	99759.49	74819.62	4987.97	19951.90

Hay que considerar que no se está incluyendo la oferta de baterías industriales. No obstante, ésta no es significativa frente al proceso de aprovechamiento de baterías usadas para automotores. Eventualmente llega a una empresa de reciclaje de plomo un lote de baterías estacionarias para sistemas de cómputo de submarinos, barcos o aviones. El periodo de tiempo de llegada y el tamaño del lote son variables impredecibles, ya que la vida útil de este tipo de baterías es muy superior al de una batería para un vehículo automotor.

En (Rey Castellanos, 2004), se muestra el comportamiento de los usuarios respecto al uso que se le da a las baterías fuera de uso. Como se ve en el **Grafico 4**, el 33% de las personas las botan, generando además de contaminación, pérdidas económicas ya que las ganancias que se obtienen al vender el plomo reciclado de estas baterías ascienden a 5.148.662 pesos por tonelada según (Mundi, 2015).

En conclusión es importante realizar un análisis detallado de cada uno de los factores mencionados en este capítulo debido a que estos son elementos que pueden o no restringir los alcances de un proyecto de logística inversa. Se puede decir que los factores que afectan en concreto la finalidad de un proyecto de logística inversa orientado a la disminución de residuos peligrosos son los relacionados con el reciclaje, recolección, transporte, almacenamiento y aprovechamiento, debido a su fuerte relación con el tipo de residuo. Por otra parte un proyecto orientado a la disminución de costos o maximización de la utilidad, se encuentra más afectado por la oferta de residuos a recuperar.

Gráfico 4. Tratamiento de baterías fuera de uso



Fuente: (Rey Castellanos, 2004)

Al realizar este análisis se tiene como resultado información de primera mano que servirá como input para estructurar las funciones de desempeño y proceder a la formulación del proyecto de interés, de esta manera tener una visión más cercana a la realidad y una solución que se adapte a diferentes ambientes socioeconómicos.

6. FUNCIONES DE DESEMPEÑO EN MODELOS DE LOGÍSTICA INVERSA

En este capítulo se realiza una revisión de la bibliografía referente a la logística inversa, esta vez con el fin de dar cumplimiento al segundo objetivo específico, en el cual se analiza cómo han sido abordadas las diferentes funciones de desempeño en proyectos de logística inversa. A continuación se muestra como han sido abordadas por los principales autores encontrados en la literatura.

Para el diseño de modelos matemáticos de logística inversa, se utiliza en su mayoría una estructura tradicional que contempla modelos de localización y asignación, con el fin de determinar y explicar el comportamiento y las relaciones relevantes que se establecen en los procesos de reciclaje y recuperación de residuos. En la investigación de (Barros, Dekker, & Scholten, 1998) se formula un modelo que considera simultáneamente, el flujo directo e inverso existente en una red logística para el reciclaje de arena. Este modelo, presenta una estructura de doble sentido. En el flujo inverso, los consumidores entregan sus productos fuera de uso, en este caso arena, en centros de recuperación, donde se clasifican, bien como válidos siendo enviados a la planta donde se procesan, o bien como no válidos siendo entonces desechados y enviados al sitio de disposición final, mientras que en el flujo directo, las plantas de producción re procesan, reutilizan o reciclan los productos recuperados y se distribuyen a los almacenes desde donde se enviarán a los consumidores.

En el diseño de modelos también se debe destacar que las redes de logística directa son redes divergentes, es decir, hay pocos orígenes o sitios de inicio como son fábricas de producción, y muchos destinos o Clientes, sin embargo, las redes de logística inversa se caracterizan por ser redes convergentes, es decir, muchos orígenes (Generadores de residuos), y pocos destinos que son las fábricas que utilizan material reciclado de los residuos y los transforma en nuevos productos.

Dentro de la cadena de suministro, el flujo directo presenta generalmente un sistema pull, en el cual el cliente es el destino del flujo de bienes, mientras que en el flujo inverso se presenta un sistema push, el cual trabaja de manera más centralizada obligando a que se cumplan los programas de producción que han sido calculados por adelantado, (Monterroso, 2000). Puede existir también un efecto pull en la logística inversa debido a la demanda de los productos recuperados, esto se destaca generalmente en las empresas que tiene una memoria medioambiental. Esta

situación supone que la modelación del flujo inverso involucre problemas de localización y asignación. Los diseños existentes para los sistemas de logística inversa son más elaborados que los tradicionales modelos de localización y asignación, pero siguen manteniendo tanto su estructura de funcionamiento como sus métodos de solución. Los modelos utilizados en el diseño de redes para la recuperación de residuos son básicamente, modelos clásicos de localización y asignación formulados a través de la programación lineal entera mixta, cuyo objetivo principal es la minimización de costos totales de la red.

Algunos autores entre ellos (Maldonado & Torres, 1998) señalan que la utilización de modelos matemáticos en logística inversa plantea dificultades para su utilización. Adicionalmente a los conflictos matemáticos que tienen las soluciones de la logística tradicional, en la logística inversa existen incertidumbres que afectan principalmente la oferta de residuos o productos fuera de uso. Esta incertidumbre puede ser de tipo cuantitativo, cualitativo, temporal y espacial.

La incertidumbre cuantitativa hace referencia a la cantidad de residuos a recuperar, supone un desconocimiento total o parcial del número de residuos que se podrán recuperar para ser incluidos en el sistema de logística inversa de la empresa. En la red logística directa es fácilmente identificar la cantidad de materia prima necesaria para la producción, debido a que las empresas pueden realizar un pronóstico de la demanda, y tomar medidas para atenuar el impacto de esta incertidumbre y satisfacer las necesidades del cliente.

La cantidad de residuos posibles de recuperar presenta generalmente un límite superior establecido por el número de bienes que el fabricante ha puesto en el mercado. Cuando se trata de bienes con alto grado de diferenciación, son los fabricantes quienes realizan las actividades de recolección y tratamiento de estos residuos, disminuyendo así el grado de incertidumbre ya que se eliminan varios eslabones.

La incertidumbre cualitativa hace referencia a la calidad de los residuos a recuperar, supone un desconocimiento total o parcial del estado en el que se encuentran los residuos. La alternativa de recuperación más apropiada para un producto fuera de uso, no puede ser planificada con anterioridad porque la calidad que presentará el artículo sólo se conocerá después de realizar las operaciones de desensamblado, inspección y verificación por parte del recuperador, lo que dificulta en extremo las

operaciones subsiguientes (Fernandez, 2004). Este tipo de incertidumbre permite que las empresas consideren actividades para disminuir el grado de desconocimiento del estado del residuo, como mejorar el diseño de los productos, con el fin de que sean fácilmente desmontados y permita identificar y clasificar fácilmente los elementos susceptibles de recuperar, para que reduzca el porcentaje de partes no recuperables. Otra actividad que se puede realizar, es el fortalecimiento de áreas como el servicio postventa, de manera que se haga seguimiento a los productos de mano del cliente final, se puede implementar un sistema de incentivos a aquellos clientes que gestionen la recuperación de estos productos, esto causara un incremento en las entradas al sistema.

Por otra parte cuando se habla de incertidumbre temporal, se hace referencia al momento en el cual se recuperaran los residuos. Para reducir el grado de esta incertidumbre las empresas pueden establecer un periodo de recolección, que permita al cliente recibir una bonificación o beneficio.

Según (Pozo et al., 2000) la incertidumbre espacial consiste en el desconocimiento total o parcial del lugar en el cual se van a recuperar los residuos o productos fuera de uso. Esta es la incertidumbre menos problemática ya que generalmente es el recuperador el que determina el lugar en el cual se realizara la actividad de recolección, para facilitar el retorno de los residuos determina y hasta facilita los medios para hacerlo posible.

Un aspecto muy importante de esta incertidumbre, consiste en el desconocimiento del nivel de utilización de estos centros, es decir, es razonable suponer que no todos los centros de recuperación serán igualmente utilizados, lo que ocasiona un desaprovechamiento de la capacidad instalada, que podría afectar su rentabilidad y finalmente la rentabilidad del sistema. Para evitar esto es importante involucrar a todos los miembros de la cadena en el proyecto de recuperación económica de los productos fuera de uso.

Tradicionalmente, la incertidumbre asociada a los sistemas de logística inversa se ha venido considerando mediante la utilización de diferentes escenarios en los que se resolvía el problema de programación lineal correspondiente, sin tener que modificar el carácter determinista del problema. El problema consistía, por tanto, en solucionar distintos problemas paramétricos de carácter determinista. Obviamente, la

formulación y resolución de los problemas deterministas son más sencillas que en el caso estocástico.

Dicho esto, algunos autores que destacan el uso de esta herramienta para disminuir el impacto de la incertidumbre son:

En primera instancia esta (Barros et al., 1998), quien ya hace referencia a la importancia que tiene la incertidumbre en la oferta de residuos a recuperar, teniendo en cuenta sus diferentes tipos, en los procesos de planificación y control de modelos para la recuperación de residuos y productos fuera de uso.

En Krikke et al. (1999) apuntan la necesidad de tener un conocimiento más preciso acerca de los productos fuera de uso, en lo que se refiere a la incertidumbre cuantitativa, cualitativa y temporal de éstos. Los autores se cuestionan, sin embargo, sobre las consecuencias que, en la modelización de los problemas de asignación y localización, tendría la consideración de esta incertidumbre, aunque abren la puerta al desarrollo de nuevos modelos de localización, probabilísticos o estocásticos, que permitan la modelación de esta cuestión. (Córdoba, 2014).

De igual manera en (Gomes, Barbosa, & Novais, 2007), se destaca que la formulación expandida permite cualquier número de productos y el establecimiento de una red para cada producto, garantizando las capacidades totales para cada instalación a un costo mínimo. Además, el método general se estudió en el contexto de incertidumbre en ambas demandas de productos y rendimientos, mediante el uso de un enfoque multi-escenario. La generalidad del modelo fue corroborado y los tiempos de cálculo fueron muy satisfactorios. Sin embargo, es importante tener en cuenta que a medida que aumenta el tamaño del problema, la carga computacional podría crecer.

En comparación con el tratamiento empleado en la modelación de este tipo de problemas, el hecho de considerar ambientes estocásticos hace más difícil considerar modelos de recuperación. Sin embargo, es indispensable admitir que la incertidumbre es una de las características principales de estas redes, por esta razón, se debe tener en cuenta. Posiblemente, resolver el problema con esta metodología proporcionara diferencias no tan significativas en términos de optimización, en comparación con otros tipos de modelos de carácter netamente

deterministas, sin embargo, se aportará mejor información acerca del funcionamiento de los sistemas de logística inversa.

Generalmente los diseños de modelos en sistemas de logística inversa, se realizan en un ambiente estático, en el cual las decisiones de tipo estratégico, táctico y operativo, se toman y ejecutan en el mismo periodo. Esta consideración aunque hace más fácil la formulación y solución del modelo, se aleja de la realidad existente dado a que las decisiones no se toman en un solo periodo, sino que suelen ser un proceso secuencial, las decisiones se extienden en el tiempo y condiciona la toma de las mismas.

Las decisiones a nivel operativo son las relacionadas con rutas de transporte o la asignación de cada pedido al medio de transporte más adecuado, que quedarán determinadas por decisiones de nivel superior como, por ejemplo, la asignación de clientes a los diferentes centros de distribución o los medios de transporte a utilizar (decisiones tácticas). Dicho esto, se mide en nivel de servicio al cliente por medio de las frecuencias en las entregas, el número de entregas en fecha y el tiempo de servicio, las cuales dependen en gran medida del medio de distribución seleccionado. (García, 1998).

Por otra parte las decisiones de tipo táctico estarán condicionadas por las decisiones de tipo estratégico, que son las relacionadas con número y localización de instalaciones y almacenes, canales de distribución, etc. Establecido lo anterior, el número de almacenes y su tamaño, están condicionados al nivel de servicio que se pretende ofrecer. Esta interrelación existente entre los tipos de decisiones que se toman en el sistema logístico de la empresa, también se puede contemplar en la función inversa de ésta como se muestra en la tabla.

La utilización de escenarios dinámicos para el análisis de la función inversa de la logística es todavía poco habitual. La mayoría de los modelos de logística inversa en los que se hace referencia a su naturaleza dinámica son los diseñados para el control de inventarios; es en esta actividad de la función logística donde el análisis dinámico tiene una especial relevancia, por las propias características que presentan los modelos de gestión y control de inventarios. Los inventarios están presentes a lo largo de todo el canal inverso, desde el consumidor hasta el recuperador, en las diferentes fases que lo componen. Así, se pueden generar inventarios en la recogida de los productos fuera de uso, en los centros de recuperación y clasificación y, por

supuesto, en las instalaciones donde se reprocesa el producto aplicando la correspondiente opción de recuperación: reutilización, re fabricación o reciclaje.

Dentro de la revisión bibliográfica se encontraron los siguientes trabajos relevantes en la aplicación del flujo inverso de la logística:

Con el fin de diseñar herramientas que permitan apoyar la toma de decisiones, autores como (Fleischmann et al., 1997) y (Bloemhof-Ruwaard, van Beek, Hordijk, & Van Wassenhove, 1995) realizaron los primeros análisis acerca de la implementación de la investigación de operaciones, en el análisis de cadenas de suministro, así como de las posibilidades de incorporar temas ambientales en la gestión de las mismas. En (Fleischmann et al., 1997), se plantea una clasificación de los modelos propuestos en lo que concierne a la logística inversa, esto con el fin de compararlos según el problema general tratado, los cuales son: Diseño de redes de logística inversa y localización de instalaciones; Gestión de inventarios en flujo de retorno y Planificación y control de actividades de producción.

Existen muchas investigaciones que coinciden con (Barros et al., 1998), en donde diseñan una red para la recuperación y el reciclaje de arena proveniente de construcciones. Este modelo de carácter estático, consideró distintos escenarios para tratar la incertidumbre en la cantidad y calidad de la arena recuperada. La investigación señala en primer lugar la importancia de la ubicación de los puntos de demanda de arena limpia y los puntos de oferta de arena reciclable en el establecimiento de la red de reciclado de arena. Otro aspecto relevante que este estudio muestra, es la importancia de la teoría de la localización y la gestión de reciclaje. Cada vez que una nueva red debe ser creada y el conjunto de posibilidades es demasiado grande que se deba analizar caso por caso, la teoría de localización proporciona los modelos y procedimientos de solución para abordar el problema de manera más eficiente. En segundo lugar, si la red ya está en funcionamiento, la teoría localización ofrece la posibilidad de ajustar esta red a los cambios en las instalaciones originales del problema.

En (Sheu, Chou, & Hu, 2005), plantean un modelo de programación lineal multi-objetivo, con el fin de maximizar tanto el beneficio obtenido en la cadena en flujo directo, como en el proceso de logística inversa, en una cadena de ciclo cerrado. Asignan diferente peso a cada función objetivo, con el fin de distinguir los efectos de

las funciones objetivo en un modelo de optimización que integra ambos procesos. Buscan encontrar un equilibrio entre los ingresos y los costos de ambos casos. Esta investigación tiene dos características distintivas a diferencia de otras en la literatura. Primero el problema operativo correspondiente a logística inversa integrada a una cadena de suministro verde, está matemáticamente formulado de manera generalizada, y por lo tanto no se limita a aplicaciones para sectores industriales específicos. En segundo lugar, los factores orientados a la aplicación de las normas gubernamentales correspondientes para la protección del medio ambiente, por ejemplo, los subsidios para la recuperación de subproductos utilizados, y las tasas de reciclaje que se cobran a los fabricantes, son considerados en el modelo propuesto. Por lo tanto, los efectos correspondientes pueden ayudar a determinar alternativas de solución para mejorar el rendimiento de una cadena de suministro verde. Por último, los resultados numéricos indicaron una mejora del 21,1% con respecto al sistema actual, para la cadena de suministro de una empresa productora de equipos de cómputo portátiles.

Por su parte,(Du & Evans, 2008), con un nuevo enfoque, plantean un modelo bi-objetivo que busca minimizar los costos totales y minimizar el retraso en el tiempo de ciclo para el diseño de una red inversa de un servicio de reparación posventa. Este tipo de modelo se preocupa por conocer el número de instalaciones que se requiere abrir para disminuir el tiempo de atención a los clientes, y considera la capacidad de las plantas. Adicional a esto se consideran economías de escala, con un incremento en los costos asociados a una unidad. El modelo busca encontrar soluciones no dominadas y es resuelto mediante una combinación de varios métodos: simplex dual y búsqueda dispersa. Por último y después de estudiar el impacto de otros factores, se concluye que los parámetros relacionados con los costos de instalación y transporte influyen en el resultado óptimo del primer objetivo el cual se orientaba a una estructura de red centralizada, y los parámetros relacionados con el tiempo de transporte y tiempo de ciclo, influyen principalmente en la solución óptima del segundo objetivo que opta por una estructura de red descentralizada, lo cual demuestra la relación de compensación entre los dos objetivos.

En el mismo año (Frota Neto, 2008) estudian un modelo para la asignación de flujos de productos retornados, considerando instalaciones fijas existentes, con el objetivo de minimizar el costo de las operaciones y el impacto ambiental. Se plantea un modelo de programación lineal multi-objetivo que recurre al análisis envolvente de datos (DEA, por sus siglas en ingles), para la consideración del impacto ambiental.

La investigación encuentra la frontera eficiente de Pareto, para encontrar una solución óptima y se escogió el sector de pulpa y papel europeo para validar la metodología propuesta, en la cual también se destaca la relación entre costos e impacto ambiental. Por otra parte, también se demuestra que la legislación actual ambiental, no favorecía el sector en términos de negocios.

(Ortega, 2008) por su parte, encuentra que los modelos han sido generalmente de carácter estático, por lo cual propone una metodología de solución para el problema de localización de instalaciones con múltiples posibilidades de capacidad y múltiples períodos, y lo ajusta al caso de recuperación del residuo ligero de fragmentación de los vehículos fuera de uso (con carácter dinámico). También resuelve el problema de localización de una planta de tratamiento y los centros de transferencia en una región determinada (con carácter dinámico y estocástico). Formula modelos de programación lineal entera mixta (MILP), y emplea técnicas meta-heurísticas en la solución: Algoritmos genéticos y búsqueda dispersa. A partir de los métodos de solución se concluye que las técnicas exactas son más eficientes para problemas de menor tamaño, y búsqueda dispersa para la resolución de problemas mayores.

Algunos autores se centraron en modelos genéricos para redes de logística inversa. (Zhou & Wang, 2008), establecen un modelo general para redes de reparaciones y remanufactura en problemas de localización de instalaciones, formulado en un modelo de programación lineal entera mixta y resuelto con técnicas de Branch & Bound. En esta investigación se destaca la importancia de modelar sistemas de logística inversa involucrando otras opciones de recuperación de residuos. Además de esto, se concluye que involucrar las reparaciones en el sistema de logística inversa junto con re-manufactura puede afectar la estructura de la red de manera extraordinaria y logra reducción de costos. (Gomes et al., 2007), por su parte, proponen un modelo general para redes de logística inversa con retorno de productos e incertidumbre. A diferencia de (Zhou & Wang, 2008), (Gomes et al., 2007), sí consideran las capacidades de las instalaciones y analizan diferentes escenarios. Las restricciones de capacidad se imponen a la capacidad total de almacenamiento de producto en las instalaciones, que pueden ser fábricas, almacenes o centros de distribución. Su formulación expandida permite cualquier número de productos y el establecimiento de una red para cada producto, garantizando las capacidades totales para cada instalación a un costo mínimo. Además, el método general se estudió en el contexto de incertidumbre en ambas demandas de productos y rendimientos, mediante el uso de un enfoque multi-

escenario. La generalidad del modelo fue corroborado y los tiempos de cálculo fueron muy satisfactorios. Sin embargo, es importante tener en cuenta que a medida que aumenta el tamaño del problema, la carga computacional podría crecer.

(Listeş, 2007), propone un modelo de programación entera mixta estocástico para el análisis de redes de logística inversa de ciclo cerrado en actividades de re-manufactura, con una función que considera costos e ingresos netos y busca minimizar el costo total de la red. En la función objetivo, hace una consideración de escenarios de demanda y retornos, y establece probabilidades de ocurrencia. Utiliza relajaciones lineales para solucionar el problema. Los resuelve finalmente, por técnicas de Branch and cut. La solución estocástica genera una mejora significativa en términos de rendimiento, destacando así que el enfoque estocástico tiene la capacidad de generar diferentes soluciones de tipo cualitativo que dan una visión adicional al funcionamiento del sistema. Los resultados del análisis global conducen a la conclusión principal de que el volumen es un factor poderoso en las redes integrales con opciones de re-manufactura. Por otra parte se dice que los métodos que logran ajustarse de manera más precisa a los requerimientos generales, disfrutan de una ventaja natural siempre y cuando los costos de inversión estén disponibles.

En (Ballesteros & Torres, 2014) se pretende integrar la logística inversa a la cadena de suministro como una estrategia competitiva de tal manera que permita la recuperación de los residuos al final de la vida útil del producto. El modelo matemático considera la aplicación de dos flujos a través de una estación cross docking, que son pequeños centros de distribución donde se clasifica y embarca nuevamente el producto en ambos sentidos del flujo de tal manera que los tiempos de permanencia en el sistema sean menores y el producto no sufra daños por la interacción con otros factores. El modelo propuesto considera dos escenarios, en el primero se analiza el costo de transporte del centro de producción al centro de acopio y de éste al centro de consumo tomando en cuenta un medio de transporte que llega a su destino (centro de acopio o de consumo) y retornando a los puntos de origen con el fin de realizar nuevamente la misma labor de carga. En el segundo escenario se considera el caso contrario, es decir, cuando el medio de transporte no es de propiedad de la transportadora. Se tiene un acuerdo de servicios con alguna empresa de distribución y logística bajo el cual el retorno del material reutilizable del centro de consumo al de acopio y luego al centro de producción implica un costo adicional. La oferta de los residuos no es conocida y además ésta puede disminuir a

medida que atraviesa la estación cross docking, por lo que para hallar una solución más eficiente del modelo se recomienda utilizar técnicas de modelos ocultos de Markov.

Por otra parte, (Neiva & Mayerle, 2008), formulan un modelo de programación no lineal (MINLP), con una función de costos, estableciendo un modelo para una red de reciclaje con sistema de incentivos en la gestión de llantas fuera de uso. El modelo considera la capacidad de las plantas y múltiples períodos. Como método de solución, implementaron Multiplicadores de lagrange, bisección, series de Fibonacci y una modificación del algoritmo de Teitz y Bart usado para encontrar la óptima partición. La metodología presentada en este trabajo intenta contribuir a la racionalización del proceso de residuos en un período de creciente preocupación mundial por las cuestiones ambientales y de innegable necesidad de tener cada vez mayor eficiencia y eficacia en la gestión y eliminación de residuos, así como en las tasas de reutilización y reciclaje de productos usados y subproductos. También puede ser una herramienta útil para ayudar a elevar la eficacia de los instrumentos de política gubernamental para aumentar el reciclaje y la conciencia ambiental.

(Ramezani, Bashiri, & Tavakkoli-Moghaddam, 2012), por su parte, plantean un modelo de programación lineal entera mixta, para una red de circuito cerrado o abierto con incertidumbre, que considera la capacidad de las plantas, analizan diferentes escenarios. Para lograr una solución más rápida se emplearon algoritmos de relajación. Los resultados mostraron que la configuración robusta es más fiable que el determinístico porque esta configuración no es factible en algunas tasas de demanda y de retorno (es decir, en el peor de los casos), mientras que la configuración robusta es factible y responsable de todas las condiciones, aunque los valores de ganancia de la configuración robusta son menos de la configuración determinístico.

En (Rubio Lacoba et al., 2007), se muestra los resultados de un proyecto realizado en una empresa metalúrgica del Grupo Industrial Alfonso Gallardo sobre aplicación de logística inversa en el proceso de embalaje de bobinas, etapa de la cadena de suministro donde se genera mayor cantidad de productos susceptibles de ser recuperados e incorporados nuevamente al ciclo productivo, el objetivo es crear una metodología que sea flexible y posiblemente aplicada a otra clase de empresas independientemente del sector al que pertenezcan. El análisis del actual sistema de embalaje permite observar la dificultad existente para recuperar el material usado por

cuanto el papel y las cantoneras son técnicamente irrecuperables tras desembalar. De esta forma, y en coordinación con la empresa, se propuso diseñar un sistema de logística inversa para una nueva configuración del embalaje, que permitiera la recuperación de todos sus elementos. Después de analizar diferentes configuraciones de embalaje para bobinas, concluyeron que una configuración metálica permitiría alcanzar mayores ventajas al sistema de logística inversa, a través de su reutilización y, por último, con su reciclaje en la siderurgia. Además, aprovechando el know-how del Grupo, la fabricación de este embalaje podría realizarse en alguna de sus empresas. De esta forma se determinó conveniente estudiar el diseño de un doble Sistema de Logística Inversa: uno para los productos de consumo interno, realizado por las propias empresas del Grupo, y otro para clientes externos.

Finalmente la investigación realizada por (Garzón, 2008) en su trabajo de grado, pretende estudiar la cadena de suministro de almacenes éxito y determinar la importancia en ésta para así identificar costos logísticos ocultos, eficiencia en la cadena de valor de la empresa, el proceso de reutilización del producto o la recompra del material de empaque de la propia marca, de esta manera el trabajo se refiere a tres aproximaciones: ambiental, industrial y devoluciones. Esta investigación dio como resultado conceptos en lo que concierne a la reincorporación del fenómeno de las devoluciones en tres dimensiones: Vencimiento del producto, imperfectos del producto e impacto ambiental. Es decir, la repercusión que tiene estas variables en la cadena de abastecimiento y su capacidad de respuesta en los dos sentidos: logística hacia delante y hacia atrás o en reversa.

Tabla 10. Tipos de decisiones en actividades de logística inversa

DECISIONES			
ACTIVIDADES	ESTRATEGICAS	TACTICAS	OPERATIVAS
RECOLECCION	Localización, número y capacidad de instalaciones de recogida	Asignación de residuos a centros de recogida	Rutas de recogida
	Dimensión y diseño	Gestión de inventarios de residuos recogidos	Lotes de recogida
	Tecnologías a emplear	Medios de transporte	Configuración de la carga

SELECCIÓN Y CLASIFICACION	Localización, número y capacidad de instalaciones de clasificación e inspección	Gestión de inventarios de productos recuperables	Opción 3R a utilizar: Reutilización, Re fabricación, Reciclaje
	Capacitación de trabajadores	Asignación de tareas	
		Secuencia de tareas, desmontaje, limpieza y reparaciones.	
RECUPERACION Y VALOR 3R	Tecnología	Efectos sobre el plan agregado de producción	Efectos sobre el programa maestro de producción
	Efectos sobre el plan de producción a largo plazo	Lotes de recuperación	Lista de materiales
		Gestión de inventarios de productos recuperados	
DISTRIBUCION	Canales de distribución	Asignación de productos a mercados	Rutas de distribución
	Mercados de destino	Medios de transporte	Lotes de distribución
ELIMINACION	Sistemas de eliminación	Gestión de inventarios de productos no recuperables	Manipulación de los residuos
	Destino de productos eliminados	Medios de transporte	

Fuente: (Córdoba, 2014)

En cuanto a la gestión de inventarios en la función inversa de la logística, los flujos de retorno de productos fuera de uso se ven afectados por la incertidumbre cuantitativa y temporal, es decir, la cantidad a retornar y el tiempo en el que sucederá. Es por esto que es importante para las empresas hacer seguimiento y control a los flujos de retorno mediante la utilización de métodos determinísticos o estocásticos.

Dentro de las investigaciones más relevantes respecto a escenarios dinámicos para el monitoreo de flujos de retornos se encuentra (Rubio, 2003), quien hace una clasificación de los sistemas de logística inversa y de los modelos cuantitativos empleados para su análisis, clasificándolos por las opciones de gestión para los productos recuperados (reutilización, reciclaje, re fabricación, etc.). Complementa el estudio con un análisis cuantitativo de un sistema de gestión de inventarios, mediante un ejercicio de simulación dinámica, y hace un análisis de sensibilidad.

También se encuentra la investigación de (Flores Bustos, 2014), cuyo objetivo es investigar el problema de la incertidumbre en una organización al implementar un programa de la logística inversa en cuanto a la calidad y cantidad de los productos devueltos. El problema se analiza concretamente en las fases iniciales de la logística inversa: recogida, inspección, clasificación y desensamblado de los productos retornados. Para tratar este problema se conjugaron varias herramientas: la teoría de las restricciones, el sistema de información de la empresa (MIS, por sus siglas en inglés), la administración de las relaciones con los clientes (CRM, por sus siglas en inglés), el internet y la intranet. Se observa una mayor incidencia de los modelos cualitativos en la solución del problema. En la última parte del estudio se presenta el método heurístico utilizado aplicado a un ejemplo ilustrativo. La principal conclusión es que el problema de la incertidumbre en logística inversa debe ser abordado integralmente porque al utilizar un solo método de solución, cuantitativo o cualitativo, se corre el riesgo de sub-optimizar las posibles soluciones al problema.

Es importante diseñar un modelo que permita conocer a todos los actores del proceso de manera detallada. Es difícil establecer un único sistema a través del cual modelar la función inversa de la logística. La diversidad es tal, que puede hablarse de un sistema diferente para cada empresa en cuestión, por lo que se suele decir que el diseño de la función logística se realiza a la medida; sin embargo, en determinados aspectos se intenta buscar puntos de encuentro que ayuden a simplificar la tarea.

El siguiente modelo, se enfoca principalmente en el ciclo de vida de las baterías Plomo-Acido provenientes de los municipios pertenecientes a la zona de influencia de Zarzal Valle, que comprende la cadena de suministro directo desde la obtención de la materia prima (metales, plásticos), fabricación de la batería distribución y venta (grandes superficies, almacenes de cadena, importadores, contrabando) y consumo o usuario final por sectores: público, privado y oficial.

El problema a modelar considera la instalación de centros de almacenamiento de baterías fuera de uso, por lo tanto se define una función de desempeño de costos en función de maximizar la utilidad total de la red. Algunos autores ya mencionados que han definido una función de desempeño en función del costo se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 11. Funciones de desempeño para problemas de localización de instalaciones

Autor	Función de Desempeño
Ortega M., (2008).	En esencia, la función objetivo se formula como una función de costos definida como la sumatoria de los costos variables, de enviar las cantidades de productos o materiales, desde los puntos de recolección hasta las plantas de tratamiento y los costos fijos de apertura de las posibles plantas.
Cruz R., and Ertel J., (2009).	La función objetivo está en función de los costos generados y del porcentaje de cobertura. Ellos formularon en México, un modelo para la recolección de vehículos al final de su vida útil. Plantean tres posibles escenarios, en donde se recolecta el 100%, 90% y 75% respectivamente, del total de vehículos generados.
Listes O., (2007).	En la función objetivo, hace una consideración de escenarios de demanda y retornos, y establece probabilidades de ocurrencia
Figueiredo J.N., and Mayerle S.F., (2008).	Formulan un modelo de programación no lineal (MINLP), con una función de costos, estableciendo un modelo para una red de reciclaje con sistema de incentivos en el tema de la gestión de llantas fuera de uso.
Pishvae M.S., Rabbani M., and Torabi S.A., (2011).	Diffiere entre ellos en que primero se aborda el problema considerando capacidad en los centros y plantas, pero el segundo autor considera incertidumbre en este parámetro.

Fuente: Los Autores

Una vez que la batería llega al final de su vida útil, se inicia el proceso inverso, que ocurre en el momento en el cual el usuario final desecha el producto. Después de convertirse en residuos se inicia el proceso de recolección que se realiza a través de empresas formales como son las empresas recolectoras de basura y de manera informal, los recicladores. El acopio y selección de este material lo realiza los

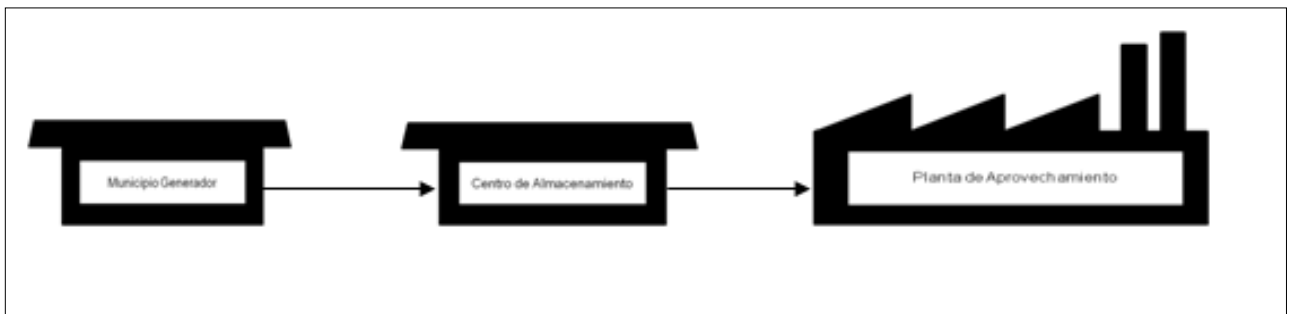
gestores (empresas especializadas) y de manera informal las cacharrerías. El proceso de manufactura consiste en separar los materiales como plomo y polipropileno de los equipos, que servirán como materia prima para la fabricación de nuevos productos.

Las funciones de desempeño están condicionadas al tipo de problema que se está abordando, de manera particular para esta investigación las funciones de desempeño expuestas que consideren costos logísticos y una utilidad o beneficio obtenido por la recuperación de residuos juegan un papel influyente en la formulación del modelo debido a que se está abordando un problema de localización de instalaciones para la recuperación de residuos. El modelo de logística inversa para el ciclo de las baterías Plomo-Acido, así como cualquier otro modelo de logística inversa, necesariamente debe tener en cuenta los factores exógenos que inciden y determinan la viabilidad del modelo como son, la cultura ciudadana, la inversión pública y privada, el crecimiento de la tecnología, problemas ambientales, económicos y sociales.

7. FORMULACION Y VALIDACION DEL MODELO

Para dar cumplimiento al tercer objetivo específico en este capítulo se plantea y valida la cadena de logística inversa a modelar, se describen las características generales de cada eslabón y sus funciones dentro del modelo propuesto el cual presenta la siguiente configuración general.

Gráfico 5. Configuración general del modelo de logística inversa propuesto



Fuente: Los Autores

7.1 GENERADORES DE RESIDUOS

En la logística inversa los generadores de residuos hacen el papel de proveedores haciendo la analogía con la función logística tradicional. En esta investigación los generadores de baterías fuera de uso son agrupados por los municipios que pertenecen a la región geográfica del norte del valle del cauca.

Para la construcción del modelo se supone que las baterías fuera de uso en cada uno de los generadores ya se encuentran seleccionadas y que no hay necesidad de realizar actividades de clasificación o selección. De igual manera se supone que la capacidad de generación de baterías fuera de uso en cada municipio tiene un incremento constante de 3%, esto se infiere de una caracterización del sector comercial de baterías plomo-acido. Cada municipio deposita las baterías fuera de uso en un lugar determinado que permite su fácil recolección.

7.2 CENTROS DE ALMACENAMIENTO

En esta investigación se considera la apertura de centros de almacenamiento en diferentes municipios generadores de residuos. La capacidad máxima de apertura de centros está definida por el número de municipios estudiados en un horizonte de planeación definido y cada centro tiene la infraestructura ideal para recepcionar y disponer el adecuado almacenamiento de las baterías fuera de uso, cumpliendo con las normas de almacenamiento de residuos peligrosos establecidas. Se supone que se cuenta con un camión con capacidad de ocho toneladas para el transporte de las baterías fuera de uso entre los municipios generadores, los centros de almacenamiento y la planta de aprovechamiento.

7.3 PLANTA DE APROVECHAMIENTO

Para esta investigación se considera una planta de aprovechamiento de residuos provenientes de baterías plomo-acido ya existente la cual recupera aproximadamente el 90% de las baterías generadas en el país y está en capacidad de reciclar 130 mil baterías por mes, garantizando así la correcta disposición del residuo final y obteniendo materia prima como plástico y plomo con 98% de pureza la cual es comercializada y utilizada para la fabricación de otras baterías o demás productos a base de estos componentes.

7.4 MODELO MATEMATICO

Los modelos matemáticos son modelos formales que utilizan el lenguaje de las matemáticas para describir el comportamiento de diferentes sistemas, expresado en parámetros, restricciones y variables de decisión. Los modelos de programación matemática se distinguen de otros porque representan la realidad mediante funciones, estas son combinación de variables, índices, parámetros en forma de restricciones y/o funciones objetivo. En general, las restricciones se deben respetar y las funciones objetivo establecen la diferencia entre una solución y otra mejor.

7.4.1 Notación

7.4.1.1 Conjuntos

TB= Conjunto de tipos de baterías fuera de uso indexado por **b**

MUNIG=Conjunto de municipios generadores de baterías fuera de uso indexado por **m**

MUNIC= Conjunto de municipios candidatos a instalar centro de almacenamiento indexado por **c**

TIM= Conjunto de periodos de tiempo, horizonte de planeación, indexado por **t**

7.4.1.2 Parámetros

U_b = Utilidad o beneficio adquirido por cada tipo de batería fuera de uso **b** recuperada.

CA_{ct} = Costo de apertura del posible centro de almacenamiento **c** en el periodo **t**.

CF_{ct} = Costo fijo de funcionamiento del posible centro de almacenamiento **c** en el periodo **t**.

CTM_{mct} = Costo de transporte desde el municipio generador **m** hasta el posible centro de almacenamiento **c** en el periodo **t**.

CTP_{mt} = Costo de transporte desde el municipio generador **m** directamente hasta la planta de recuperación en el periodo **t**.

CTC_{ct} = Costo de transporte desde el posible centro de almacenamiento **c** hasta la planta de recuperación en el periodo **t**.

$DISTM_{mc}$ = Distancia entre el municipio generador **m** y el posible centro de almacenamiento **c**.

$DISTP_m$ = Distancia entre el municipio generador **m** y la planta de recuperación.

$DISTC_c$ = Distancia entre el posible centro de almacenamiento **c** y la planta de recuperación.

OB_{bmt} = Oferta de baterías fuera de uso tipo **b** del municipio generador **m** en el periodo **t**.

I_{bct} = Inventario inicial de cada tipo de baterías fuera de uso **b** en el posible centro de almacenamiento **c** en el periodo actual.

V_b = Volumen de cada tipo de batería fuera de uso **b**.

P_b = Peso de cada tipo de batería fuera de uso **b**.

$CAPC_c$ = Capacidad del posible centro de almacenamiento **c**.

$CAPP$ = Capacidad en tiempo de la planta de recuperación.

TP_b = Tiempo de proceso por cada tipo de batería fuera de uso **b**.

CPM = Capacidad de peso del camión.

CVM = Capacidad en volumen del camión.

7.4.1.3 Variables de decisión

Q_{bmct} = Cantidad de cada tipo de baterías fuera de uso **b**, a enviar desde el municipio generador **m** hasta el posible centro de almacenamiento **c** en el periodo **t**.

C_{bmt} = Cantidad de cada tipo de baterías fuera de uso **b**, a enviar desde el municipio generador **m** directamente hasta la planta de recuperación en el periodo **t**.

K_{bct} = Cantidad de cada tipo de baterías fuera de uso **b**, a enviar desde el posible centro de almacenamiento **c** hasta la planta de recuperación en el periodo **t**.

A_{ct} = Variable binaria que toma valor de **1** si el centro de almacenamiento **c** se abre en el periodo **t**, y toma valor igual a **0** en el caso contrario.

IC_{bct} = Inventario inicial de cada tipo de batería fuera de uso **b** en el posible centro de almacenamiento **c** para el periodo **t**.

NVM_{mct} = Numero de viajes a realizar entre el municipio generador **m**, el centro de almacenamiento **c** y la planta de recuperación en el periodo **t**.

NVP_{mt} = Numero de viajes a realizar entre el municipio generador **m** y la planta de recuperación en el periodo **t**.

NVC_{ct} = Numero de viajes a realizar entre el posible centro de almacenamiento **c** y la planta de recuperación en el periodo **t**.

7.5 DESCRIPCION MATEMATICA

FUNCION OBJETIVO

$MAXIMIZAR\ UTILIDAD\ TOTAL = Ingreso\ Total - Costos\ Totales$

$$\begin{aligned}
& \sum_{b \in TB} \sum_{m \in MUNIG} \sum_{t \in TIM} C_{bmt} * U_b + \sum_{b \in TB} \sum_{c \in MUNIC} \sum_{t \in TIM} K_{bct} * U_b - \\
& \sum_{c \in MUNIC} \sum_{t \in TIM} CA_{ct} * A_{ct} - \sum_{c \in MUNIC} \sum_{t \in TIM} CF_{ct} - \\
& \sum_{m \in MUNIG} \sum_{c \in MUNIC} \sum_{t \in TIM} CTM_{mct} * DISTM_{mc} * NV_{mct} - \\
& \sum_{m \in MUNIG} \sum_{t \in TIM} CTP_{mt} * DISTP_m * NV_{mt} - \sum_{c \in MUNIC} \sum_{t \in TIM} CTC_{ct} * DISTC_c * NV_{ct} \quad (1)
\end{aligned}$$

Subject to:

$$\sum_{c \in MUNIC} Q_{bmct} + C_{bmt} = OB_{bmt} \quad \forall b \in TB, m \in MUNIG, t \in TIM \quad (2)$$

$$IC_{bc(t-1)} + \sum_{m \in MUNIG} Q_{bmct} = K_{bct} + IC_{bct} \quad \forall b \in TB, c \in MUNIC, t \in TIM / t > 1 \quad (4)$$

$$II_{bct} + \sum_{m \in MUNIG} Q_{bmct} = K_{bct} + IC_{bct} \quad \forall b \in TB, c \in MUNIC, t \in TIM / t = 1 \quad (3)$$

$$\sum_{b \in TB} \sum_{m \in MUNIG} Q_{bmct} * V_b \leq CAPC_c * A_{ct} \quad \forall c \in MUNIC, t \in TIM \quad (5)$$

$$\sum_{b \in TB} \sum_{m \in MUNIG} C_{bmt} * TP_b + \sum_{b \in TB} \sum_{c \in MUNIC} K_{bct} * TP_b \leq CAPP \quad \forall t \in TIM \quad (6)$$

$$\sum_{b \in TB} Q_{bmct} * P_b \leq CPM * NVM_{mct} \quad \forall m \in MUNIG, c \in MUNIC, t \in TIM \quad (7)$$

$$\sum_{b \in TB} C_{bmt} * P_b \leq CPM * NVP_{mt} \quad \forall m \in MUNIG, t \in TIM \quad (8)$$

$$\sum_{b \in TB} K_{bct} * P_b \leq CPM * NVC_{ct} \quad \forall c \in MUNIC, t \in TIM \quad (9)$$

$$\sum_{b \in TB} Q_{bmct} * V_b \leq CVM * NVM_{mct} \quad \forall m \in MUNIG, c \in MUNIC, t \in TIM \quad (10)$$

$$\sum_{b \in TB} C_{bmt} * V_b \leq CVM * NVP_{mt} \quad \forall m \in MUNIG, t \in TIM \quad (11)$$

$$\sum_{b \in TB} K_{bct} * V_b \leq CVM * NVC_{ct} \quad \forall c \in MUNIC, t \in TIM \quad (12)$$

En donde la ecuación (1) que representa la función objetivo, determina la utilidad máxima al final del horizonte de planeación, esta se obtiene al hacer la diferencia entre la utilidad obtenida por cada batería reciclada la cual esta expresada en términos del ahorro generado por cantidad de material recuperado y los costos asociados a la red los cuales están compuestos respectivamente por:

- Costos de apertura del posible centro de almacenamiento.
- Costos fijos de funcionamiento del posible centro.
- Costos de transporte entre el municipio generador y el posible centro de almacenamiento.
- Costos de transporte entre el municipio generador y la planta de aprovechamiento.
- Costos de transporte entre el posible centro de almacenamiento y la planta de aprovechamiento.

Por otra parte en la ecuación (2), se hace referencia a una restricción de balance de oferta, la cual indica que las baterías fuera de uso que salen de cada municipio generador ya sea para el posible centro de almacenamiento o para la planta de recuperación directamente sean iguales a la oferta total del municipio generador en cada periodo.

Las ecuaciones (3 y 4), representan restricciones de balance de flujo en el posible centro de almacenamiento. La ecuación (3) indica que lo que entra al centro mas el inventario del periodo anterior debe ser igual a lo que sale del centro mas el inventario del periodo actual y se aplica para periodos de $t > 1$. De igual manera la restricción (4) balancea el flujo del centro pero esta vez se aplica para el periodo inicial, es decir, $t=1$.

La ecuación (5), representa una restricción de capacidad volumétrica del posible centro de almacenamiento, esta indica que las baterías enviadas a este centro por su respectivo volumen no deben exceder la capacidad del centro si este se instala.

De igual manera se restringe la capacidad de la planta de aprovechamiento de residuos en la ecuación (6), esta vez se restringe la capacidad en términos de tiempo necesario para procesar cada batería reciclada según su referencia.

En las ecuaciones (7, 8 y 9) se restringe la capacidad del camión en cuanto al peso máximo permitido expresado en toneladas, estas tres restricciones difieren entre si según su destino, es decir, existe la posibilidad de realizar viajes entre el municipio generador y el centro de almacenamiento, así como también desde el centro de almacenamiento a la planta de recuperación, y se puede realizar viajes directos entre los municipios generadores y la planta de recuperación, es por esto que la restricción de capacidad del camión se debe aplicar a las tres posibilidades.

Por último en las ecuaciones (10,11 y 12) se restringe el camión en cuanto a la capacidad volumétrica. Estas restricciones tienen una relación directa con el número de viajes a realizar, por lo tanto también se aplica la restricción volumétrica del camión a las tres posibilidades de transporte. Esto se debe a que si se excede la capacidad del camión tanto en peso como en volumen se deben realizar varios viajes.

8. ANALISIS DE RESULTADOS

Se validó una instancia con el fin de analizar el modelo matemático propuesto en cinco periodos de tiempo, algunos datos utilizados para este análisis fueron tomados de la literatura mientras que otros datos como la oferta, costos de transporte, capacidad del centro de almacenamiento y tiempo de proceso por batería entre otros, son resultado de una inferencia realizada sobre el sector.

Con estos datos se creó el archivo de modelo y el archivo de datos, así como también se construyó el archivo de comandos. Para la solución, se programó el modelo en lenguaje ampl y se utilizó el solver cplex. El modelo presentó 2600 variables (50 binarias y 2550 enteras), y 1555 restricciones (300 restricciones de igualdad y 1255 de desigualdad). Los resultados demuestran un buen comportamiento del modelo, el cual cumple con los requisitos establecidos y logra un valor de \$1.110.230,765 (expresado en miles) para la función objetivo.

La instancia conformada por tres tipos de baterías, diez municipios generadores y diez municipios candidatos a construir un centro de almacenamiento, los cuales son Zarzal, Roldanillo, Bolívar, La Unión, La Victoria, Toro, Versailles, El Dovio, Bugalagrande y Andalucía, quienes representan en área de influencia de la Universidad del Valle sede Zarzal, una planta de recuperación y 5 periodos de tiempo (horizonte de planeación) presentó el siguiente comportamiento:

El municipio escogido para construir el centro de almacenamiento es el municipio de Andalucía –Valle, para el caso del centro A se abre en todo el horizonte de planeación, como se muestra en el Gráfico 6.

El 100% de los flujos en cantidades de cada tipo de baterías se asignaron al centro de almacenamiento, lo que permite observar que no se realizan envíos directos desde los municipios generadores hasta la planta de recuperación.

Gráfico 6. Configuración del sistema propuesto



Fuente: Los Autores

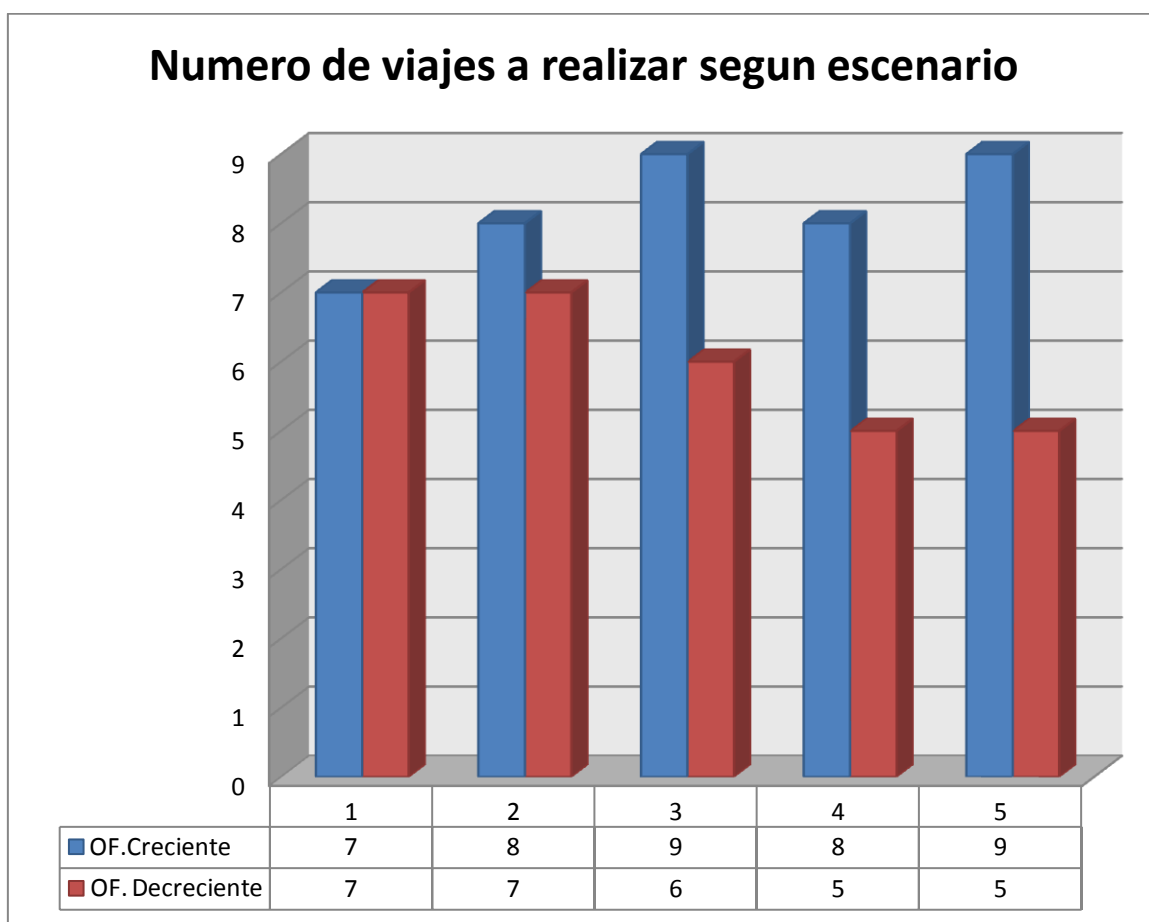
Al analizar la función objetivo se identificó que los costos más relevantes fueron los costos de transporte con una participación del 99.32% en el costo total, seguidos por los costos de apertura que tienen un 0.59% de participación y por último los costos fijos de funcionamiento que solo alcanzan un 0.09% de participación en los costos totales. Tras realizar modificaciones en los valores de los parámetros más relevantes se puede evidenciar diferentes comportamientos que permiten contrastar diferentes escenarios o situaciones.

8.1 Variación en la producción de residuos. (Oferta de baterías usadas)

En este punto se analizan dos situaciones, una en la que la oferta de residuos aumenta proporcionalmente en cada periodo de tiempo y la segunda en la que la oferta disminuye a través del tiempo. Los resultados obtenidos al realizar ambas instancias tienen la misma configuración original en la que se abre un centro de almacenamiento en el municipio de Andalucía-Valle en todo el horizonte de

planeación. Esta variación aunque no tiene efectos en la configuración inicial, si tiene efectos en algunos parámetros como el flujo de baterías fuera de uso entre los municipios generadores y el centro de almacenamiento, de igual manera el número de viajes realizados entre el centro y la planta de recuperación varía según los escenarios de la oferta como se muestra en la grafica, la razón por la que no es menor el número de instalaciones en la instancia de oferta decreciente es porque el modelo busca la recuperación eficiente de la totalidad de estas baterías.

Gráfico 7. Número de viajes a realizar según escenario



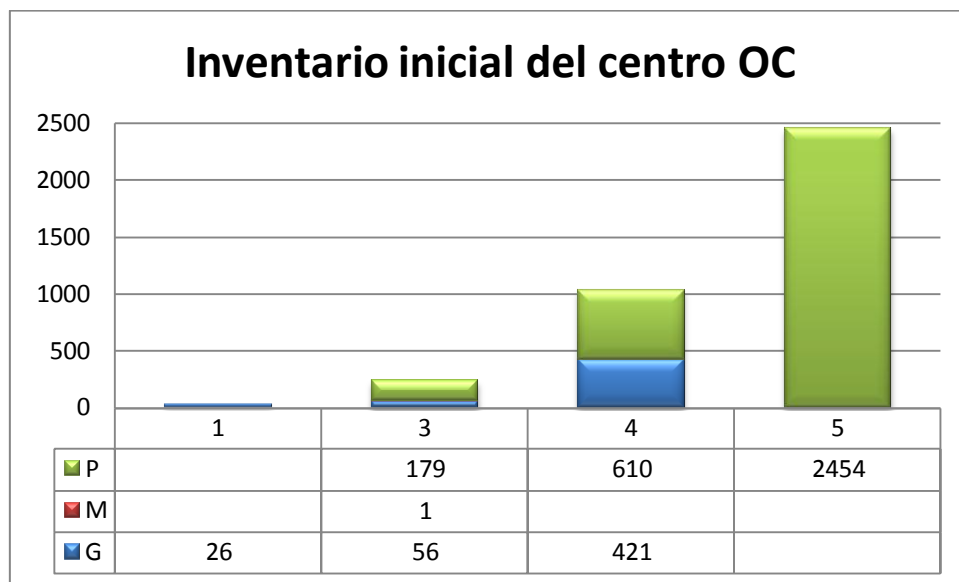
Fuente: Los Autores

En cuanto a los costos de transporte, se conoce su relación directa con la cantidad de baterías usadas a transportar, esto permite que se tenga esperado un aumento o disminución de este costo, proporcional a la cantidad que varía la oferta. Por otra parte en esta instancia analizada el número de viajes entre los municipios

generadores y el centro de almacenamiento abierto varía según el periodo de tiempo. Para el caso de variación de demanda (decreciente), se hace un viaje desde cada uno de los municipios generadores al centro de almacenamiento A en los periodos 1 al 5 y para el caso de variación de demanda (creciente) esta situación cambia a partir del periodo 3 en el cual se realizan hasta dos viajes en diferentes periodos. Esto se debe a que la capacidad del camión que transporta los residuos se mantiene constante, ocasionando la realización de varios viajes con el aumento de la carga a transportar.

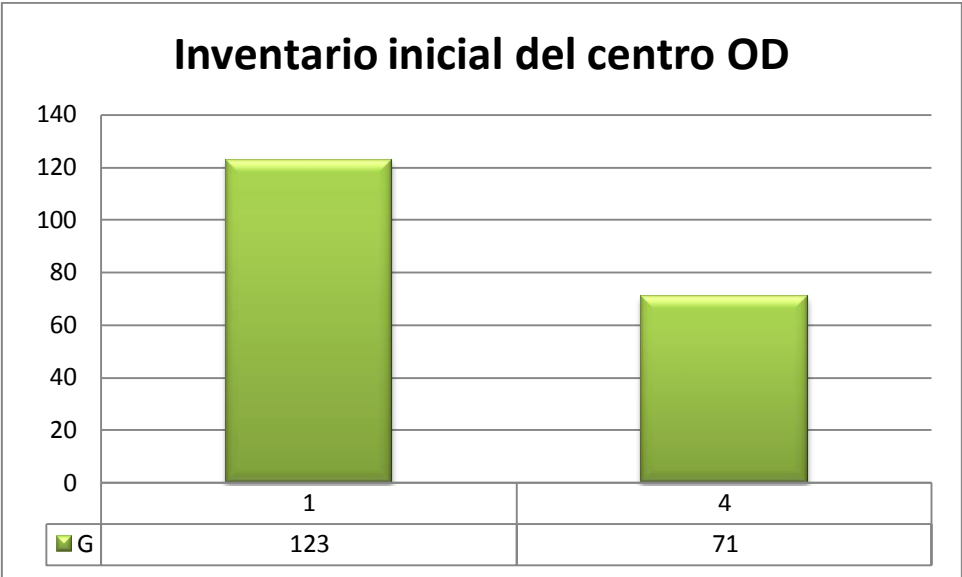
También existe una variación en el inventario inicial del centro en algunos periodos del horizonte de planeación, esto sucede porque se debe garantizar el cumplimiento de la demanda de las baterías fuera de uso en la planta de recuperación, por lo tanto es lógico decir que algún incremento o decremento en la cantidad de baterías a recuperar generara cambios en las cantidades que hay que tener en stock en diferentes periodos.

Gráfico 8. Inventario inicial del centro según escenario oferta creciente



Fuente: Los Autores

Gráfico 9. Inventario inicial del centro según escenario oferta decreciente



Fuente: Los Autores

8.2 Variación en los costos de transporte:

Para esta instancia se incremento en 10% en los costos de transporte hasta llegar a 50% al final del horizonte de planeación. Este cambio se aplico tanto a los costos de transporte desde los municipios generadores al centro de almacenamiento como a los costos de transporte del centro de almacenamiento a la planta de recuperación.

Se evidencia entonces que este cambio realizado a los costos de transporte, no tiene ningún efecto en la configuración de la red, debido a que se obtiene la configuración inicial que considera la apertura del centro A. También se conserva la participación en los costos totales de cada uno de los que lo componen, estando así los costos de transporte con un porcentaje de participación de 99.32%, en segundo y tercer lugar los costos de de apertura y funcionamiento con una participación de 0.59% y 0.09% respectivamente.

Al modificarse los flujos de carga, se produce una variación en el inventario inicial del centro en algunos periodos al igual que las situaciones analizadas anteriormente, en este caso se modifica el inventario en los mismos periodos 1 y 3 pero esta vez varia el tipo de batería como se ve en la tabla 13.

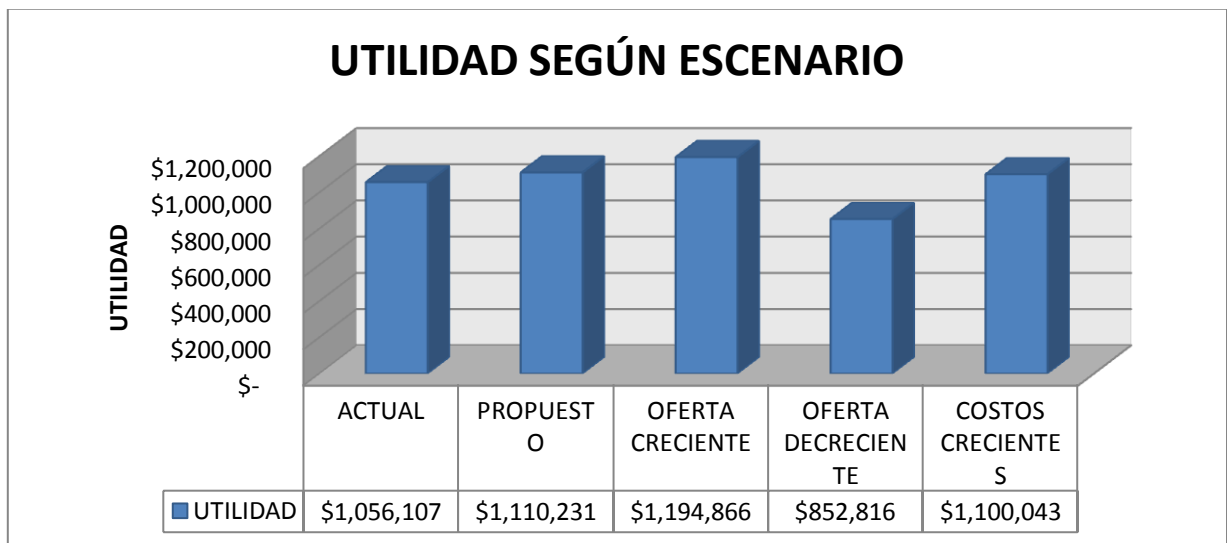
Tabla 12. Inventario Inicial del centro según escenario CT. Crecientes

Inventario Inicial según Escenario			
Tipo de Batería	Periodo	Cantidad	Escenario
G	3	100	Propuesto
P	1	86	Propuesto
G	1	26	CT.Crecientes
G	3	85	CT.Crecientes

8.3 Comparación con la situación actual del sistema

Con el fin de comparar el modelo propuesto con la situación actual de recolección de baterías fuera de uso, se creó una restricción que obligara a la variable binaria A, tomar valor de cero para que no abriera ningún centro de almacenamiento en algún periodo de tiempo. Una vez realizada esta modificación se obtiene un resultado, el cual indica que el modelo propuesto es mejor que el actual debido a que ocasiona un incremento en la utilidad total de la cadena que representa el 5.125% y un aumento del 13.139% considerando un escenario optimista para la generación de baterías fuera de uso en periodos futuros, como se puede observar en el **Gráfico 8**.

Gráfico 10. Utilidad obtenida según escenario analizado



9. CONCLUSIONES

Es importante involucrar el concepto de logística inversa en las cadenas de suministro, además de reconocer la importancia de la relación entre los beneficios ambientales y económicos obtenidos. Para esto es necesario realizar un análisis más profundo de los impactos de las estrategias a implementar con aspectos sociales y culturales; lo cual es de gran importancia en países como Colombia en donde la recuperación y el aprovechamiento de residuos es una práctica poco interiorizada en los consumidores y en la que tiene una alta participación el sector informal.

Es necesario integrar la logística inversa dentro del resto de la cadena de suministro, provocar sinergias con la logística directa y llegar a acuerdos de nivel de servicio entre proveedores y clientes. Es determinante que se involucren además de la alta dirección, áreas y actividades como diseño, compras, producción, finanzas, logística, marketing, recursos humanos, etc. Todas las actividades que se efectúen en el proceso de LI deben ser monitoreadas en forma eficiente, con el propósito de reducir sus costos logísticos, a partir de un sistema de control, cuya información facilite el conocimiento de la realidad del proceso en el menor tiempo posible.

El estudio de los factores relevantes que inciden en la aplicación del flujo inverso de la logística es de gran importancia para la formulación y desarrollo de un proyecto de logística inversa. Esta información es un input esencial, lo cual permite restringir o no en diferentes aspectos el problema a modelar, por lo tanto se debe realizar de manera detallada para que al final se obtenga una solución coherente con el ambiente y situación que se está estudiando.

Los factores relevantes son entonces los relacionados con impacto medioambiental, recolección, recuperación, reciclaje, transporte, almacenamiento y oferta de residuos para incorporar nuevamente al ciclo de vida del producto esta vez como materia prima de calidad.

Al realizar el análisis de las diferentes funciones de desempeño presentes en la bibliografía referente a la logística inversa, se evidencia que la mayoría de los autores involucran en estas el factor costo, especialmente en los problemas que consideran localización de instalaciones, esto con el fin de obtener un beneficio extra no solo para el medio ambiente al recuperar residuos peligrosos si no también un

beneficio económico para las empresas que se dediquen a labores de recuperación y aprovechamiento.

Dicho esto al involucrar la utilidad o beneficio obtenido por reciclar residuos en la función de desempeño de costos, permite conocer cuál será la configuración óptima de la red de logística inversa que maximice la utilidad o beneficio obtenido en términos del ahorro. Esto se adapta a empresas cuyo core no es el de recuperar estos residuos, es decir, se adapta de manera más real a empresas que se dedican a producir bienes y que quieran incluir en su plan de trabajo la utilización de residuos para producir sus bienes.

El modelo propuesto cumple con el objetivo de determinar la cantidad de centros de almacenamiento que se deben abrir en cada período de tiempo con su respectiva ubicación y la asignación de los flujos de baterías fuera de uso entre los nodos de la red, garantizando el cumplimiento de las restricciones de balance y capacidad .

Se realizó un análisis de escenarios en los que se modificaron algunos parámetros entre estos la oferta de baterías fuera de uso de los municipios generadores, en este escenario se analizaron dos situaciones en las que la oferta era creciente y decreciente. Eso permite ver que los costos asociados a la red son los parámetros más vulnerables a cambios en la demanda de residuos a recuperar, debido a que al realizar este análisis se evidencio que la configuración de la red se mantenía igual lo cual contrasta con la variación causada en la estructura de costos en ambos casos.

Se concluye entonces que para que un proyecto de logística inversa que considere recuperación y aprovechamiento de residuos sea sostenible debe contar con una oferta que crezca en cada periodo del horizonte de planeación debido a la relación directa mencionada. A mayor cantidad de residuos recuperados mayor es la utilidad y beneficio obtenido.

De igual manera se realizaron cambios en el parámetro de costos de transporte que consideraba un aumento constante de 10% en cada periodo del horizonte de planeación, con esto se evidencia nuevamente que la estructura de la red no es tan vulnerable como la estructura de los costos en la función objetivo.

10. RECOMENDACIONES

Es necesario realizar más investigaciones sobre logística inversa y sobre el impacto de diferentes factores más profundo. Como se puede ver en esta investigación y en muchas otras la logística inversa se convertirá en un tema importante en la producción y distribución de bienes por lo tanto descubrir y entender como impactan estos factores en los costos y utilidades de las compañías.

Para lograr una mejora en la modelación, se recomienda analizar una instancia más grande que sea representativa de la realidad con el fin de obtener resultados más confiables y esta vez sin involucrar en factor determinista en la oferta de baterías fuera de uso de cada municipio generador.

Es importante resaltar que a medida que el problema se hace mas grande, el tiempo de solución también lo hace, es por eso que hay que estudiar qué herramientas computacionales y de programación se adaptan mejor al tipo de problema y el tiempo en el que se requiera resolver.

La inclusión de la cultura medioambiental en las empresas no solo se limita a la formulación de proyectos de logística inversa. Es muy importante cambiar la forma de pensar de todos los elementos involucrados de tal manera que se cree una mentalidad de cuidado, desarrollo y sostenibilidad ambiental.

BIBLIOGRAFÍA

- Aecoc. (2013). Procedimientos de logística inversa en productos de alimentación y bebidas.
- Aguilar, O. (2002). Manejo ambientalmente adecuado de baterías plomo-ácido en la República de Panamá.
- Álvares, J. M. (2011). Gestión Posconsumo de Residuos Peligrosos.
- Ballesteros, J., & Torres, J. H. (2014). Logística inversa y su integración a la cadena de suministro inteligente como estrategia de competitividad empresarial : propuesta de aplicación a sistemas cross docking (Reverse Logistics and its Integration into the Smart Supply Chain as a Strategy for. *Revista Virtual Pro*, (149).
- Ballesteros Riveros, D. P., & Ballesteros Silva, P. P. (2007). IMPORTANCIA DE LA LOGÍSTICA INVERSA EN EL RESCATE DEL MEDIO AMBIENTE Importance of the Reverse Logistic one in rescue of environment. *Scientia et Technica*, (37), 315–320.
- Balli Morales, B. (2012). La logística reversa o inversa: aporte al control de devoluciones y residuos en la gestión de la cadena de abastecimiento. Retrieved from <http://www.revistadelogistica.com/La-logistica-reversa-o-inversa.asp>
- Barros, A. I., Dekker, R., & Scholten, V. (1998). A two-level network for recycling sand: A case study. *European Journal of Operational Research*, 110(2), 199–214. [http://doi.org/10.1016/S0377-2217\(98\)00093-9](http://doi.org/10.1016/S0377-2217(98)00093-9)
- Bloemhof-Ruwaard, J. M., van Beek, P., Hordijk, L., & Van Wassenhove, L. N. (1995). Interactions between operational research and environmental management. *European Journal of Operational Research*, 85(2), 229–243. [http://doi.org/10.1016/0377-2217\(94\)00294-M](http://doi.org/10.1016/0377-2217(94)00294-M)
- Boada Ortiz, A. (2003). El reciclaje, una herramienta no un concepto. *Revista Virtual Pro*, 1–25.
- Brannstrom, A., & Sumpter, D. (2005). The role of competition and clustering in population dynamics. *Proceedings. Biological Sciences / The Royal Society*, 272(1576), 2065–2072. <http://doi.org/10.1098/rspb.2005.3185>

- Cardona, M. (2007). Minimización de Residuos : una política de gestión ambiental empresarial. *Produccion + Limpia*, 1, 46–57.
- Córdoba, M. P. (2014). *MODELO DE LOGÍSTICA INVERSA PARA LA RECUPERACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS PLÁSTICOS ABS EN CALI*.
- Cure Vellojín, L., Meza González, J. C., & Amaya Mier, R. (2006). Logística inversa: una herramienta de apoyo a la competitividad de las organizaciones. *Ingeniería Y Desarrollo: Revista de La División de Ingeniería de La Universidad Del Norte*, (20), 184–202. Retrieved from <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2506560&info=resumen&idioma=ENG>
- Du, F., & Evans, G. (2008). A bi-objective reverse logistics network analysis for post-sale service. *Computers and Operations Research*, 35(8), 2617–2634. <http://doi.org/10.1016/j.cor.2006.12.020>
- Fernandez, I. (2004). *ANÁLISIS DE LA LOGÍSTICA INVERSA EN EL ENTORNO EMPRESARIAL. UNA APROXIMACIÓN CUALITATIVA*. Universidad de Oviedo.
- Fleischmann, M., Bloemhof-Ruwaard, J. M., Dekker, R., van der Laan, E., van Nunen, J. a. E. E., & Van Wassenhove, L. N. (1997). Quantitative models for reverse logistics: A review. *European Journal of Operational Research*, 103(1), 1–17. [http://doi.org/10.1016/S0377-2217\(97\)00230-0](http://doi.org/10.1016/S0377-2217(97)00230-0)
- Flores Bustos, C. E. (2014). Modelo para controlar la incertidumbre en logística inversa. *Vision Gerencial*, 189–210.
- Frota Neto, J. Q. (2008). Designing and evaluating sustainable logistics networks. *International Journal of Production Economics*, 111(2), 195–208. <http://doi.org/10.1016/j.ijpe.2006.10.014>
- Garcia, A. A. (1998). *Recomendaciones táctico-operativas para implementar un programa de logística Inversa : Estudio de caso en la industria del reciclaje*.
- García Cáceres, R., & Olaya Escobar, É. S. (2006). Caracterización De Las Cadenas De Valor Y Abastecimiento Del Sector Agroindustrial Del Café. *Cuadernos de Administración*, 19, 197–217.
- Garzón, J. A. (2008). *Logistica en reversa como uso alternativo de los recursos aplicado a la cadena de suministro de ALMACENES EXITO S.A.*

- Gomes, M. I., Barbosa, A. P., & Novais, A. (2007). An optimization model for the design of a capacitated multi-product reverse logistics network with uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 179(3), 1063–1077.
<http://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.05.032>
- Gutiérrez, J., Benayas, J., & Calvo, S. (2006). Educación Para El Desarrollo Sostenible: Evaluación De Retos Y Oportunidades Del Decenio 2005-2014. *Revista Iberoamericana de Educación*, 40(2006), 25–69.
- Hernandez Pahceco, P. (2013). Herramientas Eco (II): El plan de minimización de residuos y emisiones. Retrieved from <https://elojosostenible.wordpress.com/2013/10/09/elajoconlaempresa-herramientas-eco-ii-el-plan-de-minimizacion-de-residuos-y-emisiones/>
- IDEAM-UNICEF-CINARA, C. (2005). Marco político y normativo para la gestión integral de residuos sólidos en Colombia.
- Jacott, M. (2004). Pilas y baterías : tóxicos en casa. *Greenpeace*, 8.
- Listeş, O. (2007). A generic stochastic model for supply-and-return network design. *Computers and Operations Research*, 34(2), 417–442.
<http://doi.org/10.1016/j.cor.2005.03.007>
- Lozano, J., Mesa, O., & Restrepo, M. del P. (2006). Manual de producción más limpia y buenas prácticas ambientales. Fabricación y reciclaje de baterías.
- Maldonado, J. L., & Torres, M. D. C. (1998). *Logística inversa, una herramienta para la toma de decisiones* (Vol. 19).
- Min-Vivienda. (2014). MARCO DE GESTIÓN AMBIENTAL Y SOCIAL ACTUALIZACIÓN 2014.
- Monrroy, N., & Ahumada, M. C. (2006). Logística Reversa: “Retos para la ingeniería industrial.” *Revista de Ingeniería Universidad de Los Andes*, 23, 23–33.
- Monterroso, E. (2000). El proceso logístico y la gestión de la cadena de abastecimiento, 33. Retrieved from <http://www.unlu.edu.ar/~ope20156/pdf/logistica.pdf>
- Moreno Rojas, S. (2008). Manual de buenas prácticas ambientales para el manejo de baterías usadas de plomo ácido. *Secretaría Distrital de Ambiente. Alcaldía Mayor de Bogotá*.

- Mundi, I. (2015). Plomo Precio Mensual. Retrieved from <http://www.indexmundi.com/es/precios-de-mercado/?mercancia=plomo&meses=60&moneda=cop>
- Murillo, E. (2009). ECOEFICIENCIA. Retrieved from <http://morillozarama.blogspot.com/2009/09/ciclo-de-vida-pilas-baterias.html>
- Neiva, J., & Mayerle, S. (2008). Designing minimum-cost recycling collection networks with required throughput. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 44(5), 731–752.
<http://doi.org/10.1016/j.tre.2007.04.002>
- OCADE, SANIPLAN, & AMBIENTAL SA. (2000). Diagnostico ambiental sobre el manejo actual de baterias usadas generadas por mantenimiento del parque automotor de Santa Fe de Bogotá.
- OECD/ECLAC. (2014). OECD Environmental Performance Reviews: Colombia 2014. *OECD Publishing*.
- Ojeda Burbano, E. O. (1997). LEGISLACION NACIONAL REFERENTE A ENVASES DE PLAGUICIDAS , ACEITES USADOS Y PILAS-BATERIAS AGOTADAS.
- Ortega, M. A. (2008). *Utilización de métodos cuantitativos para el análisis de problemas de localización en logística inversa TESIS DOCTORAL*. Director.
- Ortez, A. E., & Parada, K. R. (2008). *Propuesta para la gestion ambiental de pilas y baterias fuera de uso en El Salvador*. Universidad de El Salvador.
- Parlamento, E. (2006). DIRECTIVA 2006/66/CE DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 6 de septiembre de 2006 relativa a las pilas y acumuladores y a los residuos de pilas y acumuladores y por la que se deroga la Directiva 91/157/CEE. *Diario Oficial de La Union Europea*, 14.
- Pozo, A., Riveiro, A., Garcia, M., Garcia, L., Guineo, D., & Sandoval, F. (2000). *MODELADO DE LA INCERTIDUMBRE ESPACIAL PARA LA LOCALIZACIÓN DE MÓVILES EN EXTERIORES*. Universidad de Malaga, Departamento de Tecnologia Electronica.
- Puentes, J. (2014). *Diseño de un modelo de logistica reversiva para las pymes del sector siderúrgico aplicable en Colombia*.

- Ramezani, M., Bashiri, M., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2012). A robust design for a closed-loop supply chain network under an uncertain environment. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 825–843. <http://doi.org/10.1007/s00170-012-4369-8>
- Rey Castellanos, J. (2004). *Diagnostico Ambiental de las Baterias Usadas de Vehículos Terrestres en el Municipio de Bucaramanga*. Universidad Industrial de Santander.
- Reyes, A. (2009). La convergencia de la logística inversa y la eco-eficiencia hacia la sostenibilidad. *Observatorio Iberoamericano Del Desarrollo Local Y La Economía Social*, 3(6), 1–13.
- Rodriguez Becerra, M. (1994). El Desarrollo Sostenible: ¿Utopia O Realidad Para Colombia? *La Política Ambiental Del Fin de Siglo: Una Agenda Para Colombia*, 21.
- Rubio Lacoba, S., Miranda González, F. J., Chamorro Mera, A., & Valero Amaro, V. (2007). A reverse logistics system at grupo industrial alfonso gallardo. *Universia Business Review*, 88–99.
- Rubio, S. (2003). *Tesis Doctoral El Sistema De Logística Inversa En La Empresa : Análisis Y Aplicaciones*.
- Santos López, F. M., & Santos De la Cruz, E. (2010). Aplicación de un modelo para la implementación de logística inversa en la etapa productiva. *Industrial Data*, 13(1), 32–39.
- SEDESOL. (1997). Reciclaje.
- Sheu, J. B., Chou, Y. H., & Hu, C. C. (2005). An integrated logistics operational model for green-supply chain management. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 41(4), 287–313. <http://doi.org/10.1016/j.tre.2004.07.001>
- Teleco. (2015). ¿Que hago con las baterias y celulares usados? Retrieved from http://www.teleco.com.br/es/es_bat.asp
- Tope, R. (2013). Reciclaje de Baterias. Retrieved from http://www.revistatope.com/138_art_emison_AUT.html

- UNEP. (2010). El Convenio de Basilea. Retrieved from http://excops.unep.ch/index.php?option=com_content&view=article&id=71:the-basel-convention&catid=42:the-conventions&Itemid=27&lang=es
- Uruguay, U. R. (2013). La cadena de valor y la ventaja competitiva. Retrieved from <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:La+Cadena+de+Valor+y+la+Ventaja+Competitiva.#5>
- Valencia, A. C. (2005). Plan de Gestion Integral de Residuos Solidos. *Alcaldia Municipal Zarzal Valle*, 287.
- Zapata, X., & Gonzalez, B. (2007). *Problematica ambiental derivada de la disposicion final de pilas usadas en Colombia*. Universidad Industrial de Santander.
- Zhou, Y., & Wang, S. (2008). Generic Model of Reverse Logistics Network Design. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 8(3), 71–78. [http://doi.org/10.1016/S1570-6672\(08\)60025-2](http://doi.org/10.1016/S1570-6672(08)60025-2)

