

**EL IMPACTO EN EL MEDIO AMBIENTE TRAS EL POST-CONSUMO DE PILAS
DOMÉSTICAS**

**JASON DAVID COLLAZOS CARDONA
ANDRÉS FELIPE CIFUENTES CERÓN**

**UNIVERSIDAD ICESI
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
CALI
MAYO 2018**

**EL IMPACTO EN EL MEDIO AMBIENTE TRAS EL POST-CONSUMO DE PILAS
DOMÉSTICAS**

**JASON DAVID COLLAZOS CARDONA
ANDRÉS FELIPE CIFUENTES CERÓN**

Proyecto de Grado para optar el título de Ingeniero Industrial

**Director proyecto
KATHERINE ORTEGÓN MOSQUERA PhD**

**UNIVERSIDAD ICESI
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
CALI
MAYO 2018**

Contenido

	pág.
GLOSARIO	7
RESUMEN	8
1 Introducción	9
1.1 Contexto, Justificación y Formulación del Problema	10
2 Objetivos	12
2.1 Objetivo del Proyecto.....	12
2.2 Objetivos Específicos.....	12
3 Marco de Referencia	13
4 Metodología	19
5 Resultados	21
5.1 Conclusiones	39
5.2 Recomendaciones	39
6 Bibliografía	40

Lista de Figuras

Ilustración 1 “Ciclo de pre-consumo y posconsumo de pilas domesticas” Fuente: Elaboración propia con información obtenida de la encuesta.....	23
Ilustración 2: Cantidad de pilas por país de origen en los últimos tres años. (Fuente: Base de datos Legis Comex)	24
Ilustración 3: “Cantidad de pilas por país de procedencia en los últimos tres años”. (Fuente: Base de datos Legis Comex).....	25
Ilustración 4: Cantidad de pilas transportadas por cada medio de transporte en los últimos tres años. (Fuente: Base de datos Legis Comex).....	26
Ilustración 5: Cantidad y peso de pilas por departamento destino en Colombia. (Fuente: Base de datos Legis Comex).....	27
Ilustración 6: Comparación de las pilas con el tercer método, de disposición.	33
Ilustración 7: Ciclo de vida pila Alcalina con el método de relleno sanitario	34
Ilustración 8: Ciclo de vida pila Alcalina con el método reciclar	34
Ilustración 9: Comparación tres métodos disposición final de la pila alcalina	35
Ilustración 10: Indicadores Minpoint Pila Alcalina – Incineración.....	43
Ilustración 11: Indicador Minpoint Pila Alcalina - Reciclaje	43
Ilustración 12: Indicador Minpoint pila Alcalina - Relleno sanitario.....	44

Lista de Tablas

Tabla 1: Composición y uso de pilas (primarias-secundarias); (INTI, 2016).....	13
Tabla 2: Alternativas de recuperación por tipo de pila NiMH - NiCd	29
Tabla 3: Alternativas de recuperación por tipo de pila Zn-C	29
Tabla 4: Alternativas de recuperación por tipo de pila Mn - Alcalina.....	30
Tabla 5: Alternativas de recuperación por tipo de pila Li	30
Tabla 6: Cantidad de gramos por material en cada tipo de pila	31
Tabla 7: Proceso productivo relacionado a la fabricación de las pilas domesticas	32
Tabla 8: Comparación de cambio climático en el ecosistema y en la salud humana	36

Lista de Anexos

Anexo 1. Preguntas para empresas-ciclo post consumo	42
Anexo 2. Base de datos Legis Comex-Characterización de pilas.....	42
Anexo 3. Gráficos Caracterización indicador Minpoint.....	40

GLOSARIO

REP: Responsabilidad extendida al productor, “Instrumento de política ambiental que extiende las obligaciones a los productores física y/o financiera, con respecto a sus productos en la etapa de posconsumo de su ciclo de vida”.

PILAS DOMÉSTICAS: “Dispositivo, generalmente pequeño, en el que la energía química se transforma en eléctrica”.

RSU: Residuos sólidos urbanos,

CICLO DE VIDA: Etapas consecutivas e interrelacionadas de un sistema del producto, desde la adquisición de materia prima o de su generación a partir de los recursos naturales hasta la disposición final.

ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA: Recopilación y evaluación de las entradas, las salidas y los impactos ambientales potenciales de un sistema del producto a través de su ciclo de vida.

IMPACTO: Cualquier cambio en el ambiente, sea adverso o beneficioso, resultante de las actividades, productos o servicios de una organización.

DESECHO: Producto del que se prescinde por no tener ya utilidad.

RECICLAJE: El reciclaje es un proceso cuyo objetivo es convertir desechos en nuevos productos para prevenir el desuso de materiales potencialmente útiles, reducir el consumo de nueva materia prima, reducir el uso de energía, reducir la contaminación del aire y del agua por medio de la reducción de la necesidad de los sistemas de desechos convencionales, así como también disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero.

RESPONSABILIDAD SOCIAL: La responsabilidad social es un término que se refiere a la carga, compromiso u obligación, de los miembros de una sociedad ya sea como individuos o como miembros de algún grupo tienen, tanto entre sí como para la sociedad en su conjunto

TRANSFORMACIÓN: El término transformación hace referencia a la acción o procedimiento mediante el cual algo se modifica, altera o cambia de forma manteniendo su identidad. Adjetivo: transformada, transformado una materia a otra cosa.

RESUMEN

En la actualidad el consumo de energía viene en auge, el consumo de dispositivos como las pilas primarias que abastecen de energía de forma portátil es aún un recurso muy utilizado para el funcionamiento de diferentes artefactos de entretenimiento o de trabajo. Al terminar la vida útil de las pilas primarias y cumplir con su funcionamiento, estas son en la gran mayoría desechadas en diferentes alternativas de disposición que existen en Colombia, y cada una tiene un impacto diferente en el medio ambiente. Se logró identificar el ciclo de consumo que tiene las pilas, desde su preconsumo hasta su posconsumo.

Se llevó a cabo una ardua investigación sobre las alternativas de recuperación y se profundizó en el método de reciclaje como la mejor opción para la disposición de pilas domésticas según el análisis realizado a través de un software para evaluar los impactos ambientales, en productos, procesos, actividades. Se concluye que el método de reciclaje más adecuado es Batenus de la hidrometalurgia, ya que su consumo de energía para procesar mezcla de pilas usadas de los diferentes tipos es mucho menor que los procesos que se especializan en un tipo de pila.

1 Introducción

El objetivo de este proyecto es identificar el impacto ambiental y plantear diferentes alternativas para su recuperación de metales o materiales pesados que se puedan reintroducir en operaciones productivas. Asimismo, resulta importante saber que las pilas son una fuente de energía bastante usada en la actualidad para obtener a través de ellas energía eléctrica, cuya función es posible dado a que transforma la energía química contenida en sus materiales activos mediante un proceso de oxidación – reducción electroquímica. Sin embargo, para nadie es un secreto que la gestión de los residuos sólidos entre estos las pilas domesticas representan hoy en día una gran problemática para el medio ambiente. (Greenpeace Argentina, 2010).

Debido a la contaminación y a la gran preocupación de este problema a nivel mundial se toman medidas para reducir ese impacto que se podría llegar a tener; en Colombia por ejemplo se crea la resolución 1297 del año 2010 por parte del ministerio de medio ambiente y desarrollo sostenible en donde se les atribuye la responsabilidad a las empresas importadoras, comercializadores y demás relacionadas con el producto hacerse cargo de la vida útil de cada una. Según el estudio realizado durante un periodo de tiempo de 7 años en Colombia desde el 2002 al 2008 se depositaron 77.000 toneladas de pilas domesticas en rellenos sanitarios (Ministerio de Ambiente vivienda y desarrollo territorial, 2010)

Aunque se ha seguido investigando constantemente alternativas de recuperación y aprovechamiento de materiales de aquellos residuos, en Colombia aún no se cuenta con la infraestructura adecuada para hacer un cierre del ciclo de vida de esa totalidad de materiales, sin embargo, a la fecha se han presentado avances como lo es la empresa ECOTEC S.A ubicada en la ciudad de Cali, dicha empresa cuenta con la primera planta de reciclaje de pilas primarias la cual se encarga de procesar gran parte de las pilas usadas que son recicladas por los programas de pos-consumo, esto sin mencionar que quedan muchas oportunidades y retos de mejora en pro de la situación ambiental por parte de residuos peligrosos en este país.

Palabras claves: Pilas, Vida útil, Aprovechamiento de residuos, Legislaciones, Reciclaje.

1.1 Contexto, Justificación y Formulación del Problema

Dado al aumento en el grado de contaminación que se presenta en el planeta y a la contaminación de recursos naturales, se podría decir que el futuro depende del medio ambiente y la sostenibilidad.(EL MUNDO, 2014). La gestión de los residuos de pilas representa hoy por hoy un problema medioambiental con unas circunstancias complicadas debido a sus componentes principales como; carbón, cadmio, litio, mercurio, manganeso entre otros metales pesados que estando expuestas a la intemperie pueden representar un alto nivel de toxicidad tanto en ecosistemas como en seres humanos.

Resulta importante entender que estos productos son utilizados en grandes cantidades de artefactos prescindibles como lo son las linternas, mandos de la Tv o consola, cámaras fotográficas, juguetes, y otras de uso común como es el caso del reloj; por lo tanto, existe una gran cantidad de residuos que quizá no están siendo manipulados de una forma adecuada como es el caso de Colombia unos años atrás, en donde terminado el ciclo de vida de las pilas domésticas, estas eran eliminadas junto a residuos sólidos domiciliarios, y posteriormente llevadas hasta rellenos sanitarios donde sin conocimiento alguno se le prestaba las mismas condiciones que a cualquier otro residuo común, continuando su ciclo de descomposición y alterando ciertos aspectos medioambientales.

En Colombia, el residuo en promedio anual de pilas domésticas es de 11,000 toneladas, de las cuales 8,000 de estas corresponden a zinc-carbono, 2,000 alcalinas y 1,000 toneladas restantes corresponden a pilas secundarias y de botón. (Ministerio de Ambiente vivienda y desarrollo territorial, 2010).

Es entonces cuando surge el término de Responsabilidad Extendida al Productor (REP¹), el cual obliga a las empresas productoras y distribuidoras a implementar un plan de acción para recuperar un porcentaje de las ventas de los productos que se entregan al consumidor final logrando así mitigar el impacto ambiental que estos producen, garantizando un sistema en el cual se pueda dar un adecuado cierre de ciclo al producto. En Colombia, se empezaron a aplicar las regulaciones establecidas en la resolución anteriormente expuesta, pero para poder cumplir con las exigencias del cuidado del medio ambiente se necesita hacer una inversión demasiado costosa para la recolección, infraestructura, herramientas y dispositivos necesarios para el debido tratamiento de los residuos, no existen centros de acopio de estos residuos por alta logística y costos que representan.

Por lo anterior, en Colombia hay una sociedad conformada por distintas empresas del mismo sector económico que se unieron para tratar el problema con las normas

¹ “Instrumento de política ambiental que extiende las obligaciones a los productores física y/o financiera, con respecto a sus productos en la etapa de posconsumo de su ciclo de vida”.

que exige el estado, en un caso más concreto es el colectivo de la Asociación Nacional de empresarios de Colombia (ANDI). Esta entidad trabaja a través del programa de post-consumo denominado “Pilas con el Ambiente”, el cual está conformado por once empresas que manejan la fabricación y distribución de pilas domésticas, las cuales abarcan el 60% del mercado colombiano, (ANDI, 2010).

Teniendo en cuenta cifras y datos recopilados en el proyecto, se busca hacer un informe costo beneficio para una empresa de la región que se encuentra en una situación similar (recolectando pilas); cuyo objetivo principal es lograr identificar el impacto que tiene el no terminar con un cierre de ciclo de vida adecuado, rescatando unas posibles alternativas de recuperación que pueden ser de utilidad para que la empresa logre comprender la magnitud del problema que se tiene y cómo lograría disminuirlo.

Ahora bien, como se ha expuesto anteriormente, se sabe que el impacto ambiental tras el posconsumo de pilas domésticas es un problema de magnitud a nivel mundial, para lo que nos centramos al caso de Colombia, y resulta por preguntarse ¿cómo se puede disminuir este impacto causado por los anteriores artefactos? Como primera situación es de total importancia educar y concientizar que el impacto en el medio ambiente es totalmente preocupante, por dicha razón es pertinente buscar, desarrollar, implementar cualquier alternativa que ayude con la mitigación de este problema ya sea de un porcentaje de contaminación bajo o de un porcentaje de contaminación alarmante como lo es el caso de las pilas domesticas que hacen parte de los RSU.

Como bien se ha dicho, toneladas de pilas al año no tienen una disposición final adecuada, al menos en muchos países del nuevo continente, esto significa que su descomposición en el largo plazo está afectando al entorno, incluyendo tanto el ecosistema como la vida humana.

Cuando se estudia la literatura con respecto al tema, se encuentra que existen alternativas de recuperación basadas en la industria de la metalurgia tales como hidrometalurgia, piro metalurgia, entre otras; logrando así aprovechar un porcentaje de metales pesados recuperados en otras distintas áreas.

2 Objetivos

2.1 Objetivo del Proyecto

Identificar el impacto ambiental generado por el consumo de pilas domésticas, y proponer posibles alternativas de recuperación que se adapten más al entorno colombiano.

2.2 Objetivos Específicos

1. Analizar el ciclo post consumo de las pilas domésticas y llevar a cabo una categorización por tipo.
 - **Entregable 1:** Tabla de categorización de pilas domésticas por tipo.
 - **Entregable 2:** Diagrama de flujo gráfico que nos permita observar de una manera más detallada el ciclo post-consumo de las pilas domésticas.

2. Determinar el impacto ambiental de las pilas domésticas, y comparar algunas de sus alternativas de recuperación.
 - **Entregable 1:** Tabla para comparar las posibles alternativas de recuperación de las pilas domésticas.
 - **Entregable 2:** Hacer un análisis del ciclo de vida de las pilas domésticas, y estimar su impacto ambiental a través de una herramienta llamada Simapro.

3. Analizar las diferentes alternativas de recuperación de pilas domésticas y escoger la o las más adecuadas para el entorno colombiano.

3 Marco de Referencia

Las pilas son dispositivos capaces de transformar energía química contenida en sus materiales en energía eléctrica a través de una oxidación-reducción electroquímica. Cuando se habla de unidades electroquímicas, se está hablando de las células que comprenden cada pila, estando estas conectadas en un circuito en serie o paralelo; se podría decir que cada célula tiene tres componentes como lo son: el ánodo o electrodo negativo, el cátodo o electrodo positivo y un electrolito que es un conductor iónico. Las pilas son capaces de tener mayores eficiencias de conversión de energía (Ehrlich, 2002).

Ahora bien, las células y baterías electroquímicas se denominan primarias, son aquellas que no se pueden recargar o extender su vida útil, y las secundarias aquellas que son recargables, ósea que su vida útil puede ser prolongada más fácil. El consumo de pilas tiende a incrementarse año tras año, no solamente por el crecimiento de la población, sino por la cantidad de dispositivos por lo que resulta importante tener en cuenta que las pilas primarias más que las secundarias, son una amenaza para el medio ambiente por su nivel de toxicidad.

Para hablar de toxicidad resulta pertinente conocer de manera más detallada las pilas y su composición, para lo cual se mostrará en las siguientes figuras; en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se muestra una tabla de composición y usos de pilas tanto de las pilas Secundarias como de las pilas primarias.

Tabla 1: Composición y uso de pilas (primarias-secundarias); (INTI, 2016)

Pila y Batería		Composicion			Usos y Características
Tipo	Nombre	Electrodo	Notación	Compuesto	
Secundarias (Recargables)	Níquel/Cadmio	Catodo		Hidróxido de Níquel	Para equipamiento eléctrico y electrónico sencillo y de bajo consumo, teléfonos celulares, computadoras portátiles. Poseen ciclos de vida múltiples, presentando la desventajas de su relativa baja tensión. Pueden ser encargadas hasta 1000 veces y alcanzan a durar decenas de años
		Anodo		Cadmio	
		Electrolito	KOH	Hidruro de potasio	
	Níquel Hidruro metálico	Catodo		Óxido níquel	Sistemas similar al Ni/Cd, donde el Cd ha sido reemplazado por una aleación metálica capaz de almacenar hidrógeno que cumple el papel de ánodo. La densidad de energía producida es el doble de la producida por Ni/Cd, a voltajes operativos similares.
		Anodo		Hidruro metálico	
		Electrolito	KOH	Hidruro de potasio	
	Ion-Litio	Catodo		Óxido metálico con litio	Utilizada para telefonía celular, computadoras, cámaras fotográficas y de video.
		Anodo		carbon de grafito	
		Electrolito		Sales de litio y solventes orgánicos	
	Plomo	Catodo		Óxido de plomo	Automotores (para arranque de motores), industrial y domésticos.
		Anodo	Pb	plomo	
		Electrolito		ácido sulfúrico	

Pila y Batería		Composición			Usos y Características
Tipo	Nombre	Electrodo	Notación	Compuesto	
Primarias (No recargables)	Zinc/ Carbono (Zn/C) o pilas ácidas	Cátodo	C	Carbono de grafito	Para todo tipo de equipamiento eléctrico y electrónico sencillo y de bajo consumo. Denominadas "Pilas Comunes".
			MnO ₂	Dióxido de manganeso	
		Anodo	Zn	Zinc chapa metálica	
		Electrolito	NH ₄ Cl	Cloruro de amonio	
	ZnCl ₂		cloruro de zinc		
	Zinc/Dioxido de Manganeso (Zn/MnO ₂) o Alcalinas	Cátodo	MnO ₂	Dióxido de manganeso	Para todo tipo de equipamiento eléctrico y electrónico sencillo y de bajo consumo, con vida útil hasta 10 veces mayor a las "comunes". Casi todas vienen blindadas, lo que dificulta el derrame de los constituyentes. Sin embargo este blindaje no tiene duración ilimitada.
			C	Carbono de grafito	
			KOH	Hidróxido de potasio	
		Anodo	Zn	Polvo de Zinc	
			Hg	Mercurio	
			Pb	Plomo	
	Electrolito	KOH	Hidróxido de potasio		
		ZnO	Óxido de Zinc		
	Óxido de Mercurio	Cátodo	OHg	Óxido de Mercurio	Uso para audífonos y equipamiento médico. Usualmente de tipo botón. Contienen alrededor de 30% de Mercurio.
			C	Carbono	
		Anodo	ZnO	Polvo de Zinc	
			Hg	Mercurio	
	Electrolito	KOH	Hidróxido de potasio		
		ZnO	Óxido de Zinc		
	Zinc/Aire	Cátodo	Oxígeno en carbono activo		Uso para audífonos y equipamiento médico. Presentan gran cantidad de agujeros diminutos en su superficie. Alta capacidad. Contienen más del 1% de mercurio.
		Anodo	Zn	Polvo de Zinc	
			Hg	Mercurio	
	Electrolito	KOH	Hidróxido de potasio		
		Óxido de Plata	Cátodo	OAg ₂	Óxido de plata
MnO ₂	Dióxido de manganeso				
Anodo	Zn		Amalgama de Zinc		
	Hg		Mercurio		
Electrolito	KOH ó NaOH	Hidróxido de potasio ó Hidróxido de Sodio			
	ZnO	Óxido de Zinc			
Litio	Cátodo	MnO ₂ ó Bi ₂ O ₃	(Magnesio, Hierro, Carbono, etc)	Uso en calculadoras, flashes, memorias de computadoras, aplicaciones militares e industrias. Comercializadas en tipo botón, cilíndricas o geométricas especiales. Producen tres veces más energía que las alcalinas y poseen también mayor voltaje inicial (3 Voltios).	
	Anodo	Li	Litio metal		
	Electrolito	Disolvente Orgánico			

Como ya se ha mencionado anteriormente, las pilas se clasifican tanto en primarias como secundarias, sin embargo, aunque la diferencia de estas en cuanto a las cantidades desechadas son totalmente distintas, ya que las primarias superan en más de la mitad a las secundarias, pues se dice que estas últimas son más contaminantes debido a sus componentes y el porcentaje de pureza que contienen de estos metales, como lo es el mercurio, el plomo, el cadmio, níquel, hidruro metálico, litio entre otros que no están presentes en las pilas primarias. (Ehrlich, 2002)

Otra de las diferencias entre las pilas primarias y secundarias, es que las pilas primarias una vez sus componentes se han transformado en energía eléctrica ya no se pueden recuperar, a diferencia de las pilas recargables que si se puede extender su vida útil recargándolas, y una vez ambas lleguen al punto de obsolescencia en cuanto a transformación de energía química a energía eléctrica según algunos estudios se pueden llevar a un proceso de aprovechamiento y reintegrar a la industria, término conocido como economía circular (Bernardes, Espinosa, & Tenório, 2004).

Gracias a normativas internacionales las nuevas pilas tienden cada vez a utilizar la menos cantidad de componentes tóxicos para lograr disminuir la contaminación que estos generan al finalizar la vida útil; sin embargo, queda un número restante lo suficiente significativo como lo es el caso de las 11.000 toneladas de pilas que terminan en rellenos sanitarios del estudio realizado en Colombia por el (Ministerio de Ambiente vivienda y desarrollo territorial, 2010), claramente se exponen a contaminación, ya que comienzan a descomponerse mediante una serie de procesos químicos, donde sus principales agentes de descomposición son los lixiviados y gases.

Las pilas pueden llegar a sufrir a corrosión de sus carcazas, pueden ser afectadas internamente por dichos componentes que posean o externamente por los cambios climáticos. Al ser estas pilas destruidas a cielo abierto pueden llegar a explotar y regar todo el sulfato que contienen, lo cual termina siendo un problema mucho mayor ya que si llegaran a combinarse con otras sustancias del resto de residuos sólidos surgen reacciones químicas que fácilmente pueden contaminar la tierra y acuíferos, esto sin mencionar los daños a la salud y enfermedades como el manganismo.

Si se habla acerca de los posibles efectos en la salud debido a los componentes de las pilas, cabe resaltar aquellos como el mercurio (Hg), cuyo efecto cae sobre el sistema nervioso central, respiratorio, llegando a ocasionar daños en el riñón y la vista; el plomo (Pb) posee una alta probabilidad de teratogénico, sistema reproductivo y respiratorios, además de las consecuencias en el sistema nervioso central; el cadmio (Cd) elemento que puede ocasionar un posible problema cancerígeno, embriotóxico y algunos otros problemas ya mencionados como en el sistema nervioso central etc. El Níquel (Ni) además de los problemas del cadmio se le puede culpar de irritación en ojos y piel, daños en hígado y riñón; el litio ocasiona fallas respiratorias, capaz de provocar náuseas, anorexia confusión mental, visión borrosa hasta estado de coma y muerte; finalmente, el manganeso, aunque su nivel de toxicidad no es muy alta en pocas cantidades, pero si en niveles muy elevados, lo que llega a genera en el largo tiempo perturbaciones mentales, provoca movimiento lentos y descoordinados, eso sin mencionar que constituye una enfermedad denominada manganismo, altas concentraciones de este componente en el agua puede llegar a limitar el desarrollo intelectual de los niños en crecimiento.

En la mayoría de los continentes como Europa, Sur América, África, entre otros Las empresas buscan una mayor participación del mercado global y por eso invierten en el desarrollo de nuevas tecnologías que permitan tratar este tipo de metales. Los usos de nuevas tecnologías han acelerado incondicionalmente los Residuos Eléctricos y Electrónicos (RAEES). Estos residuos tienen una relación directamente proporcional con el aumento de las pilas y baterías debido a su funcionamiento. En el caso de Dinamarca se hizo un estudio a los residuos de 3.129 hogares de 12 municipios y se encontró una cantidad de 11 kg de residuos de pilas y de la cantidad que recolectan de forma selectiva entre el 16% hasta el 39% de las pilas para darle un buen tratamiento en su ciclo final. Se encontró un déficit en el proceso de aprovechar la materia prima que es recuperada en el proceso de reciclaje de las pilas domésticas, debido a las pilas domesticas que se encuentran en el medio ambiente y que no son tratadas eficientemente, se observa que existe una gran cantidad de pilas que no tiene un fin del ciclo adecuado. (Bigum, Petersen, Christensen, & Scheutz, 2013)

En el continente asiático, en países como China que es el mayor productor y consumidor de pilas, se observa la necesidad de reforzar las políticas gubernamentales para alentar y facilitar el retorno de las pilas al proceso de reciclaje y prevenir la contaminación por parte de los metales pesados. Es deber del estado buscar alternativas como enseñar a los ciudadanos sobre la temática y problemas que están relacionados a la producción y uso de las pilas domésticas además de facilitar los medios de recolección a toda la comunidad. (Sun, Yang, Huisingh, Wang, & Wang, 2015).

En el continente africano, específicamente en Camerún, en su capital política Yaundé, afirma que el abandono en zonas marginales de la ciudad y la mala administración de las pilas domesticas desechadas es perjudicial para el ecosistema y los seres humanos debido a sus componentes que son altamente tóxicos, entre las pilas analizadas se categorizó los países de origen de estas pilas como china con el mayor aporte de pilas importadas al país, segundo Japón y Alemania y tercero otras minorías. La idea es identificar las marcas de las pilas domesticas que son usadas en Camerún y tomar las acciones necesarias para implementar métodos de salida de las pilas y el flujo de material con ayuda de las marcas responsables Tetsopgang & Kuepouo, (2008).

En Latinoamérica países como Argentina, Bolivia, Venezuela, Paraguay, Brasil y Uruguay pertenecen a un grupo comercial denominado MERCOSUR, el cual ha firmado tratados de diferentes temáticas entre ellas lo comercial, político y por supuesto medio ambiental, por eso definen que las pilas son un residuo de generación masiva y de igual forma por el peligro que representan en grandes cantidades, requiere una gestión diferente a los residuos tradicionales. (Das, Das, & Lotação, 2013).

En Colombia, entre los años 2002 y 2008 cerca de 77.000 toneladas de residuos de pilas se dispusieron en rellenos sanitarios a cielo abierto; a lo que se concluye que, el 80% de los residuos de pilas en el país se disponen en rellenos sanitarios, y el otro 20% va a parar a botaderos y otros sitios de disposición final menos adecuados. (Ministerio de Ambiente vivienda y desarrollo territorial, 2010)

El uso de pilas domesticas está presente en todos los continentes y se observa la preocupación por parte de los gobiernos por establecer métodos de recolección, distribución y reciclaje eficiente de las pilas domésticas, debido a las consecuencias que generan los metales pesados en el ecosistema y la salud humana, por eso se han creado nuevas leyes, decretos, directivas sobre el tratamiento de los residuos peligrosos y la responsabilidad que tiene los fabricantes en la disposición final del producto.

La Unión Europea estableció unas condiciones sobre las temáticas relacionadas con el manejo de las pilas y baterías para cuidar y amparar el medio ambiente reduciendo los impactos que generan los residuos peligrosos con la Directiva 2006/66/CE del parlamento europeo y el consejo de la unión europea, que obliga a los fabricantes a aceptar su compromiso con el medio ambiente y hacer una debida disposición final del producto. (Borrell J. & Lehtomaki P., 2006)

En Eslovaquia la recolección y el reciclado de pilas no es el adecuado, porque no se están cumpliendo las normas establecidas por la Directiva 2006/66/ES establecida por el parlamento Europeo, afirmando que los costos de recogida y transformación superan los beneficios que generan el reciclaje de las pilas domésticas, incumpliendo con la cuota de pilas procesadas adecuadamente afectando cuatro pilares fundamentales que son: la tecnología utilizada, el medio ambiente, el ámbito económico y el jurídico. En el estudio se usaron dos métodos de pronósticos de suavizamiento exponencial, el primero fue el método suma y el segundo fue el método multiplicación, ambos métodos analizaron el equilibrio de la demanda de la pilas domesticas para establecer los costos necesarios por parte de los fabricante para la venta y recolección de las pilas primarias (Symposium et al., 2012)

Países como Bélgica y Portugal al igual que muchos otros poseen una serie de normas estipuladas para las empresas involucradas en el sector del comercio de las pilas, dichas normas regidas por el parlamento europeo como; la "Legal Regime Governing Management of Batteries and Accumulators and Management of Used Batteries and Accumulators"; para toda clase de pilas y baterías, las cuales poseen un objetivo más allá de los requerimientos de la EU Battery Directive 91/157/EEC, con una meta del 25%; a cargo de municipalidades y retailers. (Greenpeace Argentina, 2010).

Según las necesidades que deben asumir todos los gobiernos sobre el reconocimiento y el cuidado del medio ambiente en sus países crearon la normativa vigente para estos temas basados en las leyes implementadas por el parlamento europeo. Ante los diferentes casos y antecedentes sobre el manejo de las pilas gastadas, se crearon las leyes y normas para esta problemática como Bélgica, Portugal, Colombia, entre otros países que pertenecen a la Unión europea y países en Latinoamérica.

Finalmente, según las necesidades que deben asumir todos los gobiernos sobre el reconocimiento y el cuidado del medio ambiente en sus países, en Colombia las empresas que fabrican importan, exportan y distribuyen pilas domesticas deben cumplir una Responsabilidad extendida del productor que garantice una disposición final del producto de acuerdo con la ley 1297 del 2010.

El proyecto tiene una problemática basada en el impacto ambiental que ocasiona la mala disposición de las pilas domésticas en Colombia, teniendo en cuenta que en dicho país solo hay una planta con las autorizaciones y documentos legales para encargarse de la disposición final de este producto sólo para un tipo de pilas salinas-alcálinas, las cuales pasan por un proceso de trituración, lixiviación, separación magnética y finalmente se utilizan estos metales como aleaciones para metales en acero inoxidable, fertilizantes, mina de lápices y grafito entre otros.

El aporte académico desde un punto de vista de la ingeniería además de calcular ese impacto ambiental que se mencionó con anterioridad a través de una herramienta profesional como Simapro y tener un análisis más detallado de dicho proceso, se pretende encontrar la o las mejores alternativas de recuperación de metales y otros materiales de una pila convenientes o asequibles para aplicarlos al entorno colombiano, lo que traería consigo una propuesta de valor que permita aumentar la cantidad o porcentaje del valor total de las pilas que son usadas y llevadas para darle una correcta disposición.

4 Metodología

Para cumplir con el objetivo general del proyecto se optó por plantear unos objetivos específicos con sus respectivos entregables los cuales permiten darle una mejor orientación y seguimiento al proyecto. Empezando por el primer objetivo en donde se propone hacer un análisis del ciclo post-consumo de las pilas domésticas y llevar a cabo una categorización por tipo de pilas se procedió a realizar una encuesta en Google forms que se encuentra en el Anexo 1, para enviarla a algunas empresas que hacen parte de un proceso de recolección para el aprovechamiento y la adecuada disposición final, entre estas se encuentran Nacional de Pilas Occidente, Grupo Retorna, Pilas con el ambiente², Ecotec S.a. De las anteriores ya mencionadas se obtuvo información pertinente para realizar el diagrama de flujo gráfico del ciclo post-consumo, véase **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

Adicional a esto, se investigó cuál era su partida arancelaria específica, esta es 8506101100, la cual identifica a un grupo específico de pilas (Pilas y baterías de pilas. eléctricas. de dióxido de manganeso. alcalinas. Cilíndricas). El código de la partida se usó en la base de datos Legis Comex que proporciona información relevante sobre la gestión del comercio internacional y las relaciones comerciales entre países latinoamericanos, usando información como importaciones en el sector de las pilas domésticas.

Se categorizaron con respecto a las cantidades, tipo, peso, zonas de Colombia que entran las pilas domésticas. Además, se prosiguió a buscar los materiales que contiene cada batería; como el uso de metales pesados como mercurio, cadmio, níquel, entre otros y el efecto que tienen las pilas, además de su materia prima en el impacto con el medio ambiente y la sociedad. se investigó con respecto a los procesos de reciclado de pilas domésticas, de los que se encontró que existen algunos colectivos y particulares haciendo recolección de pilas domesticas gastadas, uno de estos colectivos es Pilas con el Ambiente de la ANDI.

Para el segundo objetivo se planteó realizar el análisis de ciclo de vida en la herramienta de Simapro, para ello se llevó a cabo los siguientes pasos; primero se definió el tipo de pilas a las que se les haría el análisis, como lo fue la pila AA con diferentes componentes como lo son el Zinc-Carbono; Níquel-Cadmio y Alcalinas, además se estipuló una ruta de transporte Buenaventura-Yumbo y por último el método de disposición final que tienen.

Continuando con el paso a paso del entregable dos del segundo objetivo se buscaron fuentes que hablaran de las cantidades de cada material que contiene una sola pila doméstica, adicional a esto se buscaron los procesos que están relacionados en la fabricación de estos productos, encontrando procesos muy

² Programa de recolección de pilas a nivel nacional, creado por la ANDI.

generales y difíciles de detallar en las bases de Simapro o que no fue posible determinar.

Por lo anterior dicho, se tomó la decisión de usar un tipo de pila secundaria que apareció en la base de datos del Software, usando el supuesto de que en dicha pila están presentes los procesos de fabricación, el embodied energy, el consumo de agua, emisiones, entre otros datos.

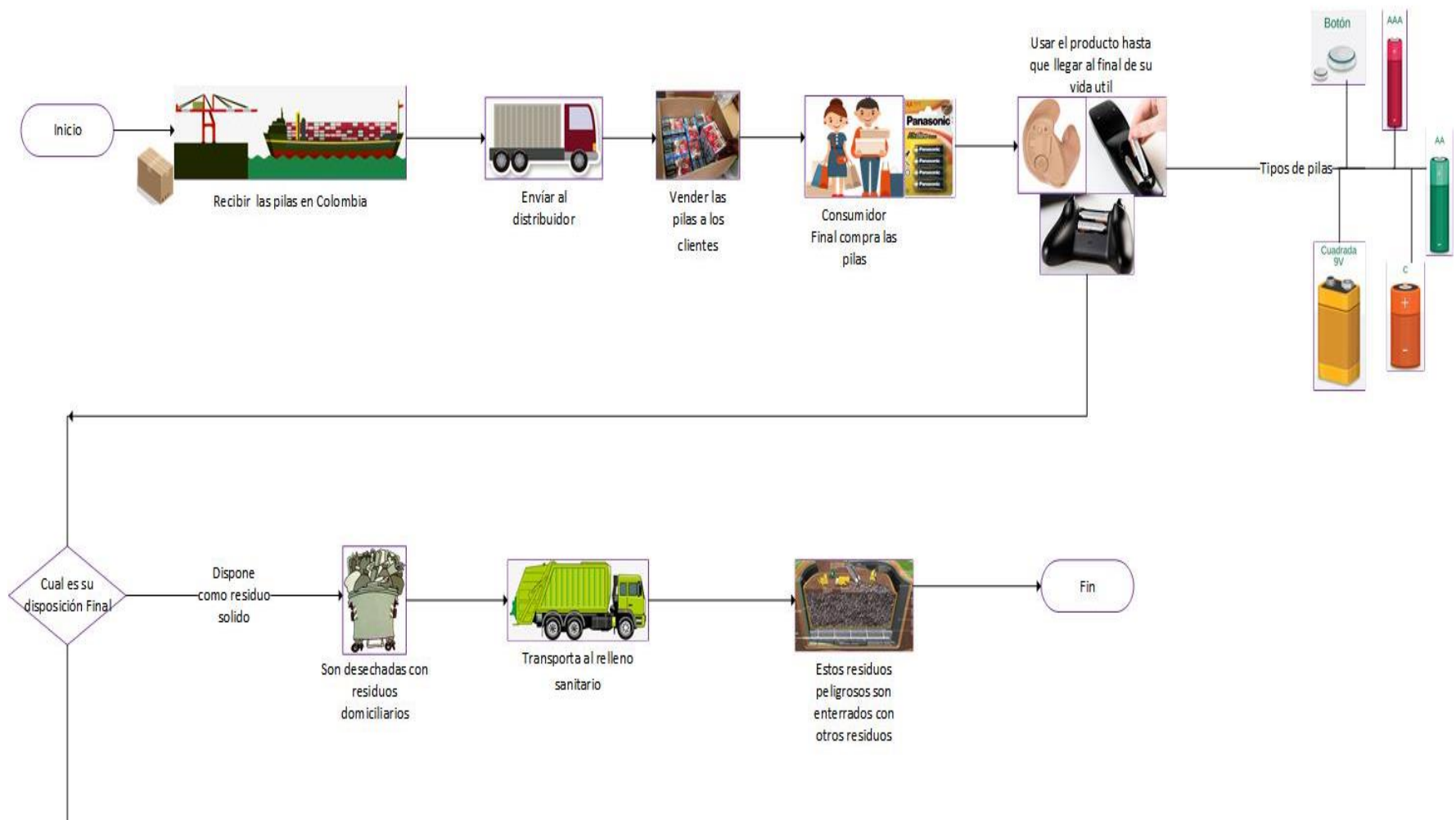
Finalmente, se hizo el procedimiento necesario para el proyecto en el software, se crearon los productos donde se asignó los materiales creados por el supuesto, se crearon componentes de LCA (Análisis de ciclo de vida), las alternativas de disposición que tendrían. Finalmente se agruparon los datos para obtener diferentes tipos de graficas comparando las pilas que se seleccionaron y sus alternativas de disposición.

Para terminar el objetivo dos del proyecto se tuvo que apoyar con información extraída de la literatura, como los papers, libros, documentos relacionados con las posibles alternativas de recuperación que se están presentando en las diferentes partes del mundo; para lo cual se realiza una tabla con las posibles alternativas, el tipo o modelo utilizado para llevar a cabo la correcta disposición, y algunas de las principales características de los cada uno de los métodos algunos como los pirometalúrgicos y los hidrometalúrgicos.

Por ultimo y no menos importante, teniendo en cuenta la tabla que se realizó con respecto a las alternativas de recuperación se procede a escoger la mejor alternativa de recuperación, para esto se tuvo en cuenta el análisis de procesos metalúrgicos, en cuanto a las comparaciones entre la pirometalurgia y la hidrometalurgia se optó por los procesos hidrometalúrgicos ya que según el informe presentado por Fröhlich & Sewing, resulta mucho más económico en temas de consumo energético y capacidad para tratar diferentes tipos de pilas simultáneamente, permitiendo así la obtención de más componentes contenidos por las pilas.

5 Resultados

Los resultados que se obtuvieron para el objetivo uno fueron la realización de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** que nos permite conocer de una manera más detallada el ciclo post-consumo de las pilas en la actualidad, que como se puede ver empieza por una etapa de pre-consumo de pilas hasta que llega al final de su vida útil, lo que conlleva a cuestionar a los consumidores y demás partes interesadas ¿qué pasa con las pilas después de su vida útil?. A lo que llegamos que existe una etapa de post-consumo que empieza por una recolección en diferentes canales como lo es el comercial, institucional y doméstico, esta recolección la hacen operadores logísticos como Openmarket, Eco Industriales, AGL logística, los cuales llevan estos dispositivos al centro de acopio de la empresa Ecotec S.A donde se hace posteriormente una segregación de las pilas alcalinas-salinas de las demás domésticas, siendo estas últimas pesadas, empaçadas y exportadores a países que tenga la infraestructura y los permisos medio ambientales pertinentes para tratar este tipo de productos. Las pilas alcalinas-salinas son tratadas en la planta a través de un proceso de trituración, lixiviación, proceso térmico de secado y separación magnética, al final se encuentran con un polvo residual negro con el fin de producir sales minerales ricos en zinc y manganeso para la venta como materia prima y posteriormente convertirlo en fertilizantes grafito para la mina de los lápices o inclusive aleaciones de acero.



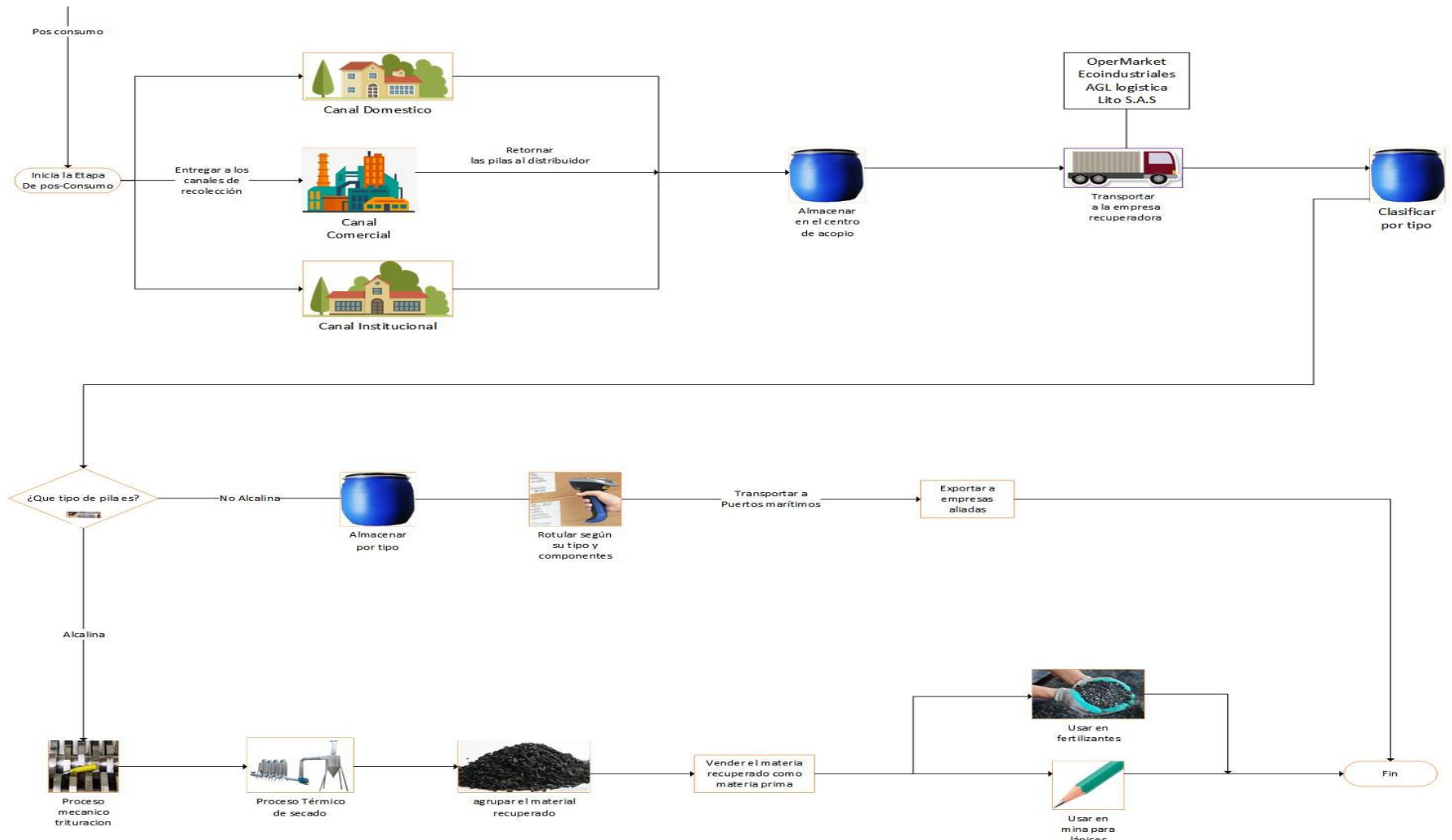


Ilustración 1 “Ciclo de pre-consumo y posconsumo de pilas domesticas” Fuente: Elaboración propia con información obtenida de la encuesta.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se pueden evidenciar países con una participación lo suficientemente considerable a través de los últimos tres años (2014, 2015, 2016) en donde China siendo el principal país productor tiene un decrecimiento dándoles mayor participación de fábrica a países como Singapur, Tailandia e Indonesia, los cuales crecen exponencialmente.

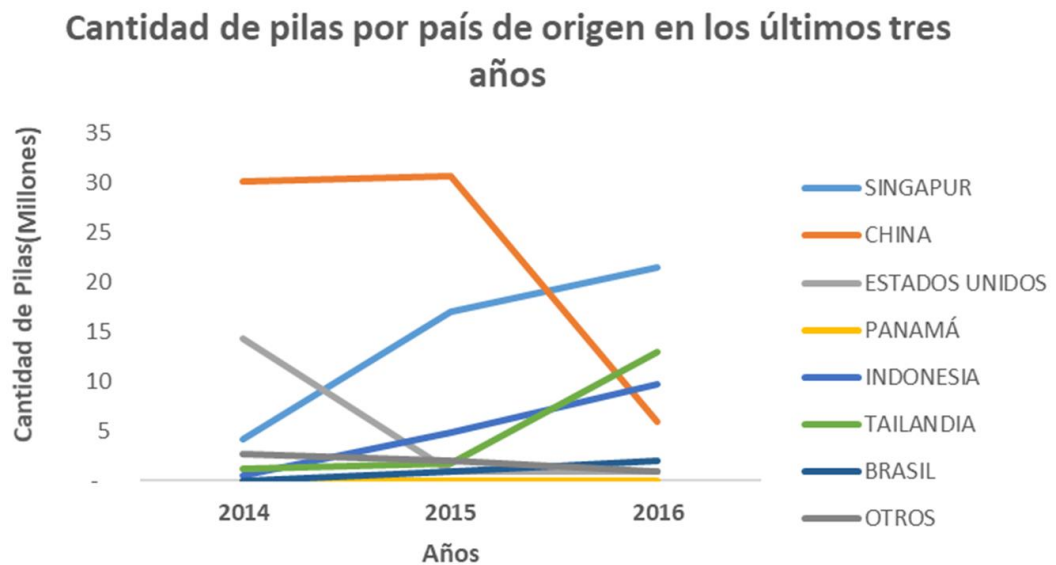


Ilustración 2: Cantidad de pilas por país de origen en los últimos tres años. (Fuente: Base de datos Legis Comex)

Para la se presentan los países con mayor cantidad de pilas de exportación, donde claramente se puede evidenciar una situación muy parecida a la anterior en los países de origen, y es que China según la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** ha dejado de ser una de las mayores potencias en este tipo de pilas, para lo que resulta sorprendente que los otros tres países ya mencionados anteriormente como Singapur, Indonesia y Tailandia estén teniendo una participación abrupta en los últimos tres años.

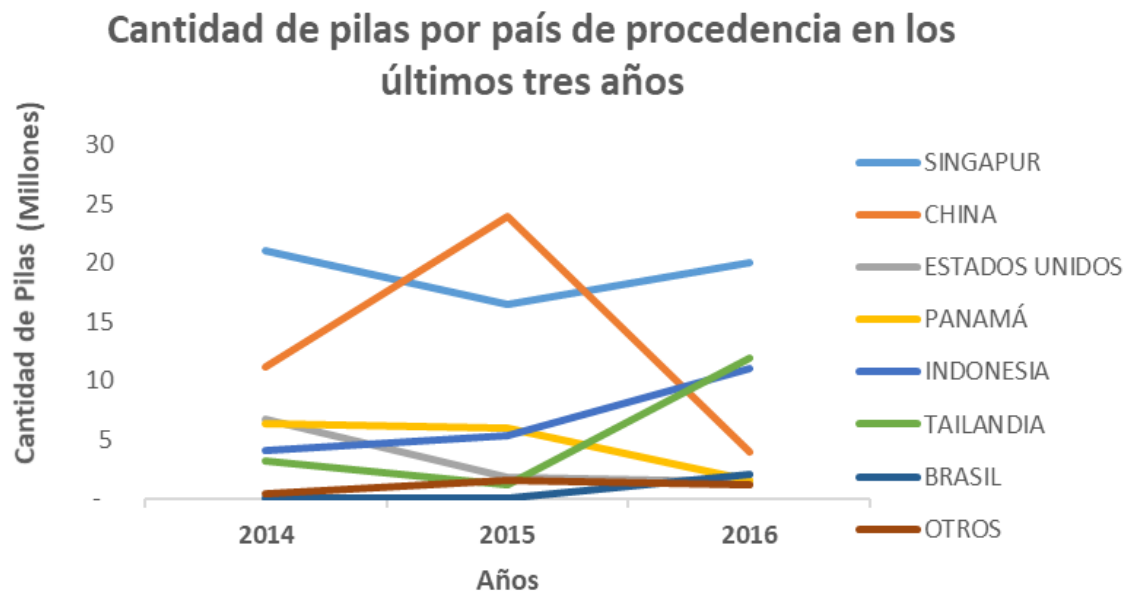


Ilustración 3: “Cantidad de pilas por país de procedencia en los últimos tres años”. (Fuente: Base de datos Legis Comex)

Para la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se puede detallar que el principal medio de transporte en el que se moviliza la carga es por vía marítima, dado a sus grandes cantidades que se llevan a los diferentes países; los medios como el terrestre y el aéreo son muy poco comunes para este tipo de carga, sin embargo, la gráfica presenta unos pequeños datos que se deben a algunas situaciones particulares como lo son casos de compras urgentes siendo el caso aéreo y terrestres debido a que se encuentre a una distancia más corta transportándola por medio terrestre que por medio marítimo

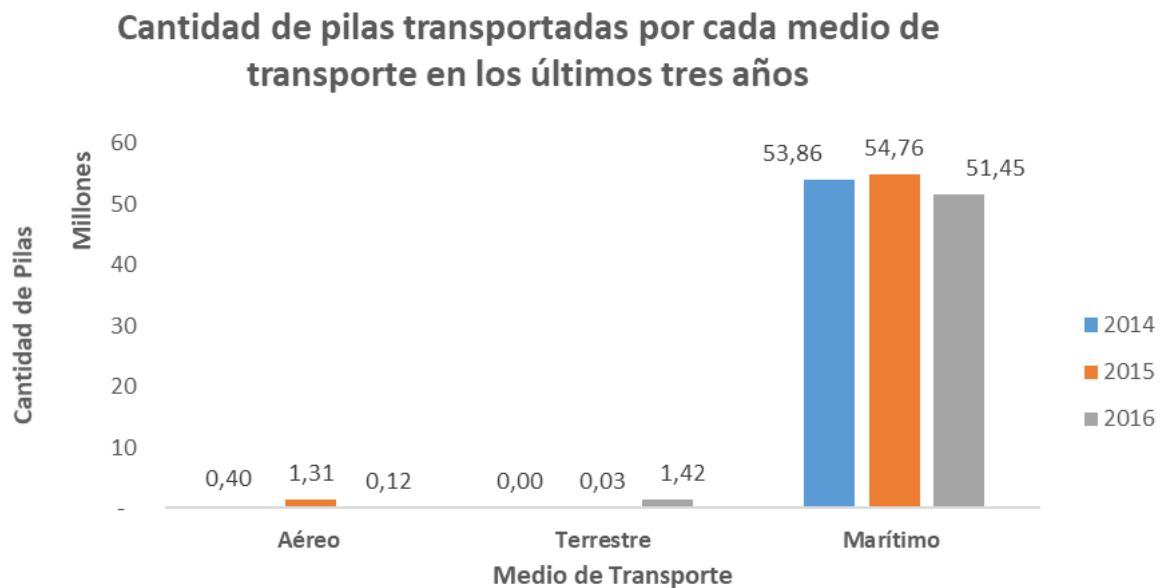


Ilustración 4: Cantidad de pilas transportadas por cada medio de transporte en los últimos tres años.
(Fuente: Base de datos Legis Comex)

Finalmente, en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** es una de las más relevantes para darle continuidad al proyecto de grado, ya que podemos identificar las cantidades ingresadas por cada departamento, para lo cual en los datos del Valle del Cauca, con un peso de 57 toneladas ingresadas, de las cuales se espera que se esté recolectando más del 40% del total, este dato resulta importante para saber qué cantidad de pilas se podría aprovechar de una mejor manera una vez terminado su ciclo de vida, claramente teniendo unas alternativas

ya establecidas, de las que podrían ser respecto a la industria de la metalurgia o algunas otras por explorar en la literatura.

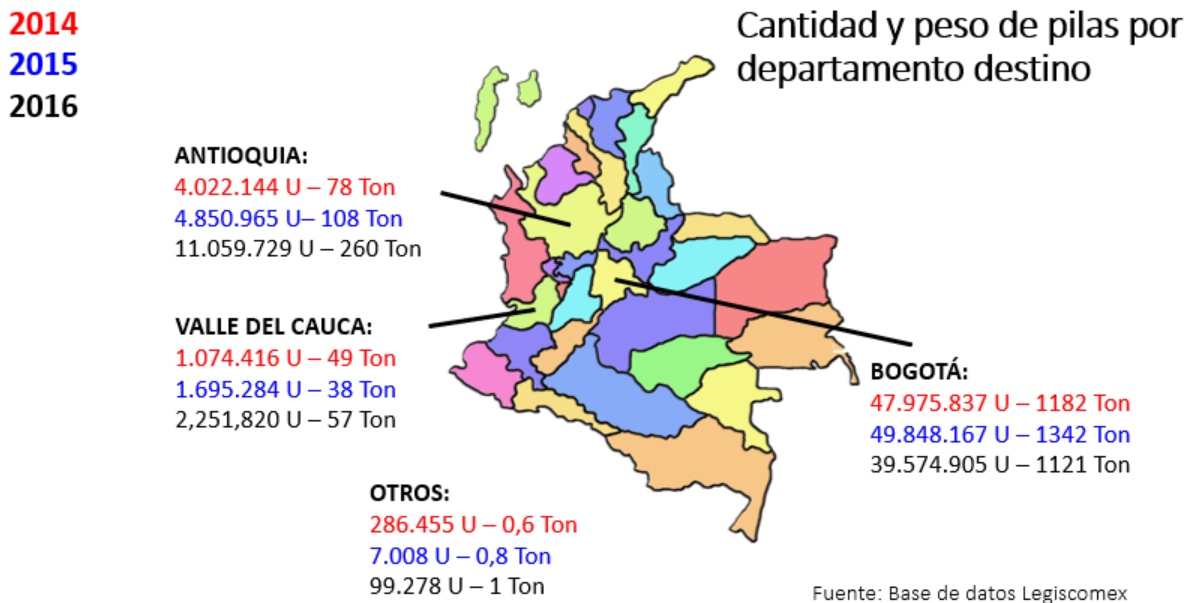


Ilustración 5: Cantidad y peso de pilas por departamento destino en Colombia. (Fuente: Base de datos Legis Comex)

Para complementar el análisis del objetivo uno, se detalla el proceso del consumo de pilas domesticas desde el pre-consumo hasta el posconsumo en **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**; este inicia en la etapa de pre-consumo con la entrada del producto vía marítima a Colombia, posteriormente, un operador logístico envía el producto al distribuidor autorizado, lo vende a sus clientes y finalmente el consumidor final compra las pilas para usarlas en diferentes equipos como, por ejemplo, controles, calentadores, audífonos, equipos médicos, entre otros.

En Colombia solo existen métodos para el tratamiento de pilas salinas-alcalinas con procesos de trituración, secado térmico y agrupación de material recuperado, que posteriormente es vendido a empresas dedicadas a fabricar fertilizantes, mina para lápices, tintas, entre otros. (Ecotec S.A, 2017)

Pero no todas las pilas recolectadas son alcalinas, hay pilas con diferentes materiales y composiciones que no pueden ser procesadas en los métodos actuales que tiene Colombia, por eso la única alternativa que se tiene es exportarlas a países aliados que si cuentan con la tecnología para hacer la reincorporación de sus materiales al sistema de producción.

Las alternativas a la disposición final de las baterías pueden ser cuatro, entre ellas está:

1. El relleno sanitario: lugar en el cual se lleva la mayoría de RSU, dentro de las cuales están las baterías domésticas.
2. Realizar un tratamiento previo de las baterías para evitar el contacto de los metales con el medio ambiente en un vertedero. Proceso poco utilizado debido a sus altos costos.
3. Incineración: Una vez las baterías se eliminan en RSU se envían a una instalación municipal de combustión de residuos; sin embargo, la incineración claramente causa emisiones de mercurio, cadmio, plomo al medio ambiente, lo cual no es una alternativa recomendable.
4. Reciclaje: Procesos de reciclaje como los hidrometalúrgicos y pirometalúrgicos sirven para extraer los metales presentes en las baterías.

Algunos procesos de reciclado evaluados por la EPBA (Asociación Europea de Baterías Portátiles) han demostrado que las baterías cuyos componentes son el mercurio, manganeso-alkalino y Zinc-manganeso son aptas para tratarse mediante procesos metalúrgicos. Diferentes empresas en países como Alemania, Francia y Estados Unidos se encuentran reciclando las pilas con un porcentaje nulo de mercurio, lo cual resulta más fácil para su aprovechamiento ya que el nivel de toxicidad es mucho menor.

La hidrometalurgia está ligada a procesos de lixiviación en medios ácidos o alcalinos, y procesos de purificación para disolver la fracción metálica. En algunos países como Bélgica, el reciclaje de pilas que tienen componentes como lo son el zinc-carbono y manganeso-alkalino, se realiza mecánicamente mientras se genera una separación magnética y el polvo residual del proceso se lixivía. Lo anterior, con el fin de crear una solución rica en zinc y manganeso, la cual se utiliza para crear aleaciones de aceros inoxidable, entre otros.

Otro proceso de la metalurgia conocida como la pirometalurgia es uno de los métodos más tradicionales y más utilizados para recuperar metales, esta se encarga de la obtención y purificación de estos a través de la utilización de calor.

A continuación, se puede observar algunas tablas con diferentes alternativas de recuperación de componentes por tipo de pila.

Tabla 2: Alternativas de recuperación por tipo de pila NiMH - NiCd

Tipo de pila	Empresas trabajando en recuperación	País	Método de recuperación	Nombre de proceso	Característica de proceso	Reutilizado en	Fuente
NiMH	NIREC	Alemania	Pirometalurgia (Metalurgia secundaria)	Molienda al vacío	1) cámara de corte. 2) contenedor colector. 3.) período de estabilización. 4) aireación para volverlo inerte. 5) separación de plástico.	Aleaciones en la producción de aceros inoxidables	(Fricke J, 1933), Entsorgung verbrauchter Gerätebatterien, GRS Batterien.
NiCd		Suecia	Pirometalurgia	SAB-NIFE	Usan hornos totalmente cerrados, donde el cadmio se destila a una temperatura entre 850 y 900°C,	baterías recargables y fusibles para sistemas automáticos y alarmas contra incendio	(Anulf T, 1990), SAB-NIFE recycling concept for nickel-cadmium batteries—an industrialized and environmentally safe process, in: Proceedings of the Sixth International Cadmium Conference, Cadmium Association, pp. 161-163.
		Francia	Pirometalurgia	SNAM-SAVAM	Usan hornos totalmente cerrados, donde el cadmio se destila a una temperatura entre 850 y 900°C,	baterías recargables y fusibles para sistemas automáticos y alarmas contra incendio	(Schweers M.E, Onusko J.C, Hanewald R.K, 1992), A pyrometallurgical process for recycling cadmium containing batteries, in: Proceedings of HMC-South'92, New Orleans, pp. 333-335.
		EE. UU	Hidrometalurgia	BATENUS	1) clasificación de baterías. Se generan corrientes individuales. 3) tratamiento criogénico. 4) separación por diferencias de tamaño, densidad y características magnéticas. 5) Lixiviación con ácido sulfúrico. 6) Electrólisis y electrodiálisis	producción de sales minerales	(Reinhard F.P, 1995) A process for the recovery of raw materials from used batteries, in: E.W. Brooman (Ed.), Electrochemical Technology Applied to Environmental Problems, The Electrochemical Society, USA.
	ACCUREC	Alemania	Mulheim	Destilación al vacío	Horno de destilación al vacío	Aleaciones de metales, para fabricación de baterías recargables..	(Fricke J, 1933), Entsorgung verbrauchter Gerätebatterien, GRS Batterien.

Tabla 3: Alternativas de recuperación por tipo de pila Zn-C

Tipo de pila	Empresas trabajando en recuperación	País	Método de recuperación	Nombre de proceso	Característica de proceso	Reutilizado en	Fuente
Zn-C	MMM-Sedema	Bélgica	Hidrometalurgia	Separación magnética y diferencia de densidad	1) procesamiento mecánico. 2) proceso de lixiviación. 3) se produce sustancia rica en Mg y Zn. 4) se purifica.	Producción de sales minerales	(Vassart A, 1999) A chemical recycling scheme for used primary batteries, in: Proceedings of the Global Symposium on Recycling Waste Treatment and Clean Technology (REWAS'99), vol. II, TMS, pp. 1139-1146
		EE. UU	Hidrometalurgia	BATENUS	1) clasificación de baterías. Se generan corrientes individuales. 3) tratamiento criogénico. 4) separación por diferencias de tamaño, densidad y características magnéticas. 5) Lixiviación con	producción de sales minerales	(Reinhard F.P, 1995) A process for the recovery of raw materials from used batteries, in: E.W. Brooman (Ed.), Electrochemical Technology Applied to Environmental Problems, The Electrochemical Society,
		Suiza	Pirometalurgia	RECYTEC	1) Pirólisis. 2) separación magnética. 3) procesos específicos de reciclaje	producción de sales minerales, fertilizantes, minas de grafito.	(Equey J.F, 1998) Recymet: our experience in the recycling of spent batteries, in: Proceedings of the Fourth International Battery Recycling Congress, Hamburg, Germany, 1998.
	CITRON	Francia	Pirometalurgia		Reciclaje de pilas basado en procesos de pirólisis y técnicas de reducción de metales.	aleación de ferromanganeso	(Burri R, 1993) The oxyreducer technology: a new process to recycle used batteries, in: Proceedings of the Fifth International Battery Recycling Congress, Deauville, France, 1993.

Tabla 4: Alternativas de recuperación por tipo de pila Mn - Alcalina

Tipo de pila	Empresas trabajando en recuperación	País	Método de recuperación	Nombre de proceso	Característica de proceso	Reutilizado en	Fuente
Mn-Alcalina	MMM-Sedema	Bélgica	Hidrometalurgia	Separación magnética y diferencia de densidad	1) procesamiento mecánico. 2) proceso de lixiviación. 3) se produce sustancia rica en Mg y Zn. 4) se purifica.	Producción de sales minerales	(Vassart A, 1999) A chemical recycling scheme for used primary batteries, in: Proceedings of the Global Symposium on Recycling Waste Treatment and Clean Technology (REWAS'99), vol. II, TMS, pp. 1139-1146
		EE. UU	Hidrometalurgia	BATENUS	1) clasificación de baterías. Se generan corrientes individuales. 3) tratamiento criogénico. 4) separación por diferencias de tamaño, densidad y características magnéticas. 5) Lixiviación con	producción de sales minerales	(Reinhard F.P, 1995) A process for the recovery of raw materials from used batteries, in: E.W. Brooman (Ed.), Electrochemical Technology Applied to Environmental Problems, The Electrochemical Society,
		Suiza	Pirometalurgia	RECYTEC	1) Pirólisis. 2) separación magnética. 3) procesos específicos de reciclaje	producción de sales minerales, fertilizantes, minas de grafito.	(Equey J.F, 1998) Recymet: our experience in the recycling of spent batteries, in: Proceedings of the Fourth International Battery Recycling Congress, Hamburg, Germany, 1998.
	CITRON	Francia	Pirometalurgia		Reciclaje de pilas basado en procesos de pirólisis y técnicas de reducción de metales.	aleación de ferromanganeso	(Burri R, 1999) The oxyreducer technology: a new process to recycle used batteries, in: Proceedings of the Fifth International Battery Recycling Congress, Deauville, France, 1999.

Tabla 5: Alternativas de recuperación por tipo de pila Li

Tipo de pila	Empresas trabajando en recuperación	País	Método de recuperación	Nombre de proceso	Característica de proceso	Reutilizado en	Fuente
Li		EE. UU	Hidrometalurgia	BATENUS	1) clasificación de baterías. Se generan corrientes individuales. 3) tratamiento criogénico. 4) separación por diferencias de tamaño, densidad y características magnéticas. 5) Lixiviación con ácido sulfúrico. 6) Electrólisis y electrodiálisis	producción de sales minerales	(Reinhard F.P, 1995) A process for the recovery of raw materials from used batteries, in: E.W. Brooman (Ed.), Electrochemical Technology Applied to Environmental Problems, The Electrochemical Society, USA.
		Suiza	Pirometalurgia	RECYTEC	1) Pirólisis. 2) separación magnética. 3) procesos específicos de reciclaje	producción de sales minerales, fertilizantes, minas de grafito.	(Equey J.F, 1998) Recymet: our experience in the recycling of spent batteries, in: Proceedings of the Fourth International Battery Recycling Congress, Hamburg, Germany, 1998.
	CITRON	Francia	Pirometalurgia		Reciclaje de pilas basado en procesos de pirólisis y técnicas de reducción de metales.	aleación de ferromanganeso	(Burri R, 1999) The oxyreducer technology: a new process to recycle used batteries, in: Proceedings of the Fifth International Battery Recycling Congress, Deauville, France, 1999.
	ACCUREC	Alemania	Mulheim	Destilación al vacío	Horno de destilación al vacío	Aleaciones de metales, para fabricación de baterías recargables..	(Fricke J, 1999) , Entsorgung verbrauchter Gerätebatterien, GRS Batterien.

Como se puede observar en las anterior tablas, se muestra una serie de métodos con algunas de las empresas respectivas que se encuentran trabajando en las áreas de reutilización, de la misma manera se logra evidenciar algunas de las características de procesos de una manera general, los componentes de las pilas como el cadmio, zinc, manganeso, litio entre otros se pueden recuperar metales haciendo uso de los métodos de la metalurgia explicados en el pasado párrafo, entre estos cabe resaltar que él más utilizado es la pirometalurgia, ya que existen procesos específicos como la pirólisis, Reducción de fracción metálica, incineración, procesos mecánicos y separación magnética que permiten la posible obtención hasta del 99,95% de pureza en condensados como el cadmio, (Bernardes et al., 2004).

El objetivo es analizar el ciclo de vida de las pilas domésticas, esta investigación involucra el análisis de los materiales que lo componen desde su extracción hasta el fin de su vida, con el fin de analizar el impacto ambiental que generan. La unidad funcional seleccionada es una pila domestica tipo AA con un peso de 23 gramos por unidad.

Es importante mencionar que se considera el mismo proceso productivo para todo el análisis, y se concederán el consumo energético, consumo de agua, materiales. Se incluirán los transportes del producto terminado desde el puerto de buenaventura hasta la empresa que los vende en Yumbo, Valle del cauca. Cabe recalcar que no se tuvo en cuenta el uso del producto.

Tabla 6: Cantidad de gramos por material en cada tipo de pila

Pila	Material	Cantidad	Unidad
Alcalina	Dioxido de manganeso	5,06	gramos
	Zinc	4	gramos
	Acero/aluminio	13,94	gramos
Niquel-metal hidruro	Nickel	5,3	gramos
	Cadmio	5,7	gramos
	Acero/aluminio	12	gramos
Zinc - carbono	Zinc	4,5	gramos
	Dioxido de manganeso	8	gramos
	Cadmio	2,5	gramos
	Acero/aluminio	6,5	gramos
	mercurio	1,5	gramos

Tabla 7: Proceso productivo relacionado a la fabricación de las pilas domesticas

Etapa	Proceso
1	Lavado del cuerpo cilindrico
2	Trituracion Dixido de manganeso
3	Llenado de componentes en el cuerpo
4	Prensa hidraulica comprime el materia en el cuerpo
5	Coloca el papel separador
6	Agrega Zinc y otros componentes
7	Coloca el colecto de corriente
8	Finaliza el proceso

En la distribución de usa un camión de 28 toneladas, hay que tener en cuenta que las cajas de pilas no se pueden poner una encima de otra en grandes cantidades porque su peso daña los otros empaques, el recorrido del camión va desde el puerto de buenaventura hasta yumbo con una distancia de 126 km, recorriendo por carga unitaria 26.66 kgkm de recorrido.

En el desarrollo del análisis en SimaPro, se usa el Eco-indicador Recipe Endpoint, este reúne diferentes categorías de impacto definidas en el Minpoint enfocadas a problemas detallados, entre ellas agotamiento del ozono, toxicidad humana, cambio climático entre otros. El uso del medidor Endpoint está orientado al problema en general en tres categorías de impactos que son Salud humana, Ecosistema y por ultimo Costos de los recursos. El análisis de estas tres categorías usa la medida de Puntuación única (pt) esta agrupa las categorías de impacto único otorgando una cantidad de puntos a cada una de ellas, generando que todas las categorías estén bajo la misma unidad. (SimaPro, s.f.)

El análisis del ciclo de vida nos muestra diferentes graficas sobre las emisiones que genera las pilas domesticas en diferentes escenarios, los cuales son los métodos de disposición. En la etapa final existen tres alternativas las cuales se puede analizar la disposición final de las pilas domésticas, la siguiente grafica nos muestra la comparación de las pilas en el relleno sanitario.

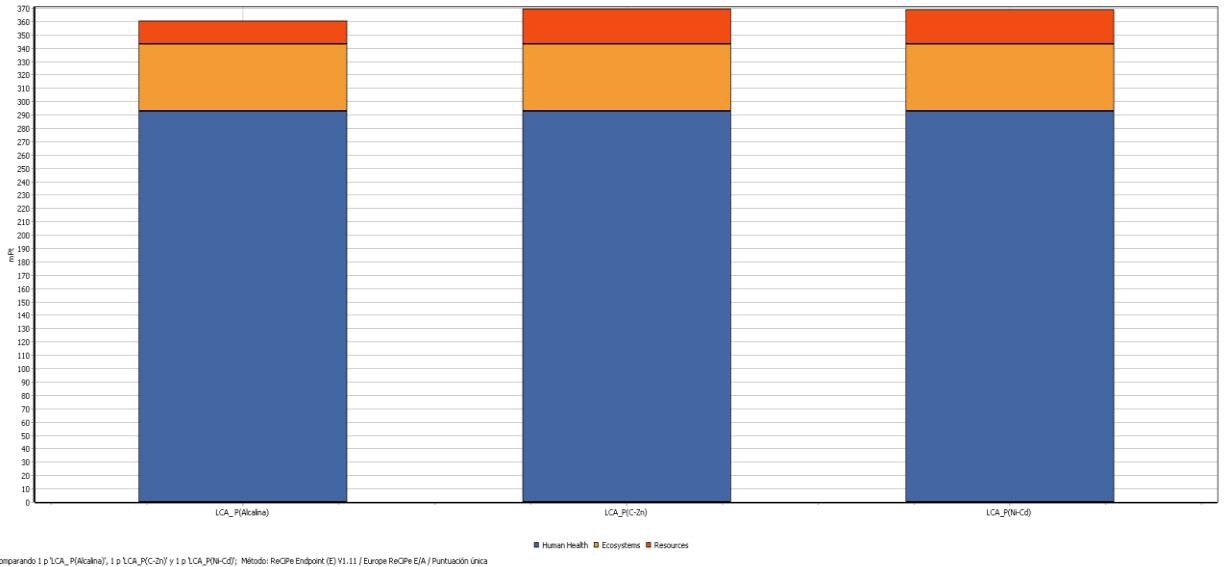


Ilustración 6: Comparación de las pilas con el tercer método, de disposición.

Se usó el método de relleno sanitario ya que en Colombia los residuos sólidos, de los hogares son llevados a rellenos sanitarios. Se puede observar que la pila alcalina es la que menos perjudica debido que su puntaje único de 360 mpt que está por debajo de las otras dos pilas, perjudicando menos el ambiente en cuestión de sus recursos, usando los indicadores de punto medio para mencionar una disminución en el uso de los recursos fósiles y minerales.

La categoría Salud humana es la que mayor representación tiene en la gráfica, está reúne algunos impactos de problemas ambientales únicos como material participado, agotamiento del ozono, desarrollo de cáncer por toxicidad humana, entre otros. Incrementando enfermedades respiratorias, varios tipos de cáncer, incremento de otras enfermedades.

Podemos observar más detalladamente la pila alcalina

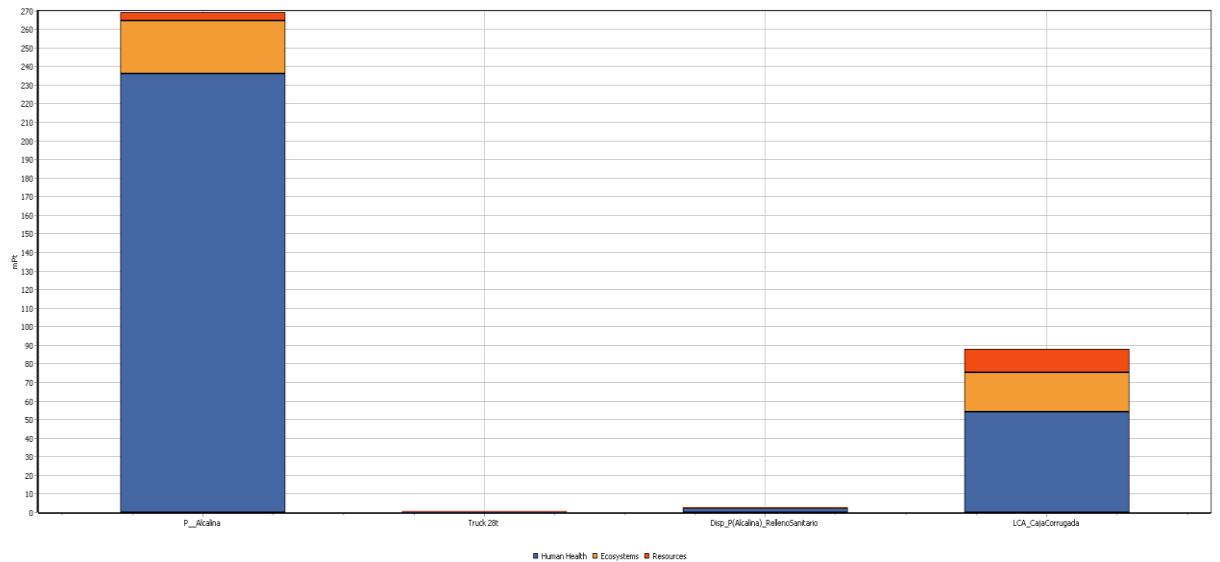


Ilustración 7: Ciclo de vida pila Alcalina con el método de relleno sanitario

Podemos observar que el ciclo de vida de la pila alcalina, usando el método de disposición de relleno sanitario, el que presenta el puntaje más bajo en el indicador endpoint es la distribución de las pilas en el camión, en cambio el puntaje más alto está asociado a la pila alcalina, como se explicó en la gráfica anterior. Además se agrega el uso de la caja corrugada que es un implemento para la comercialización de las pilas, que presenta un puntaje 90 mpt debido a sus materiales e impactos que generan en el eco-indicador. Por último el método de disposición al relleno sanitario presenta un puntaje muy bajo en el eco-indicador recipe endpoint, afectando principalmente en la salud humana.

En la siguiente gráfica se analiza la pila Alcalina, cambiando el método de disposición.

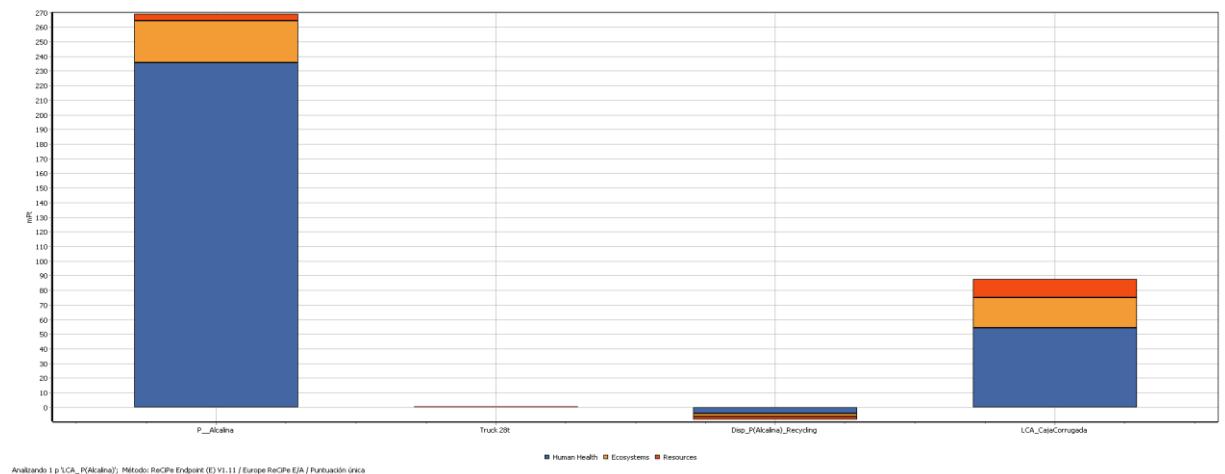


Ilustración 8: Ciclo de vida pila Alcalina con el método reciclar

Según la gráfica, los componentes de la pila, el uso de la caja corrugada para el empaque de las pilas y el uso de un medio de transporte para la distribución de estas están definidos según su proceso de fabricación, materiales usados, impacto que genera en la salud humana, ecosistema y en los recursos. Podemos observar que el consumo de materiales es el mismo pero su diferencia radica, cambiando los métodos tradicionales e implementar un método de posconsumo como el reciclaje. En puntaje de este método en el eco-indicador *récipe endpoint* es negativo, indicando que sus efectos no impactan negativamente en la salud humana, en el ecosistema y en los recursos.

El siguiente diagrama es la comparación de las pilas Alcalina en los tres métodos de disposición

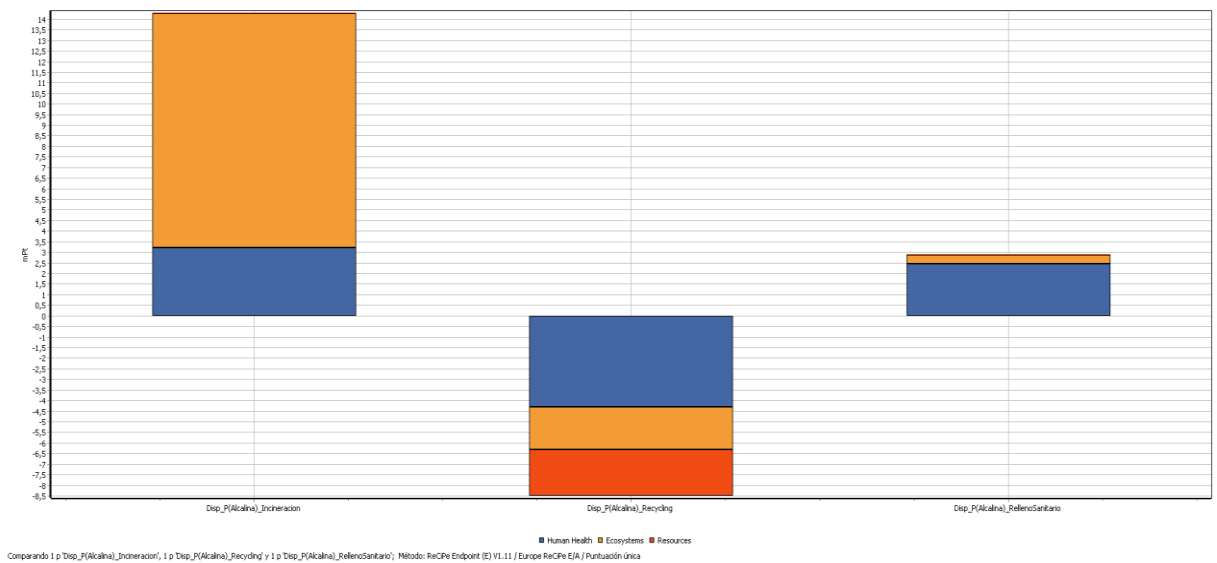


Ilustración 9: Comparación tres métodos disposición final de la pila alcalina

Según la gráfica el método de incineración es que mayor puntaje tiene en el eco-indicador *endpoint* con un puntaje de 15 mpt, al quemar las unidades de pilas, los componentes que la conforman se liberan al aire, con este método se observa que el mayor impacto es ocasionado hacia el ecosistema y menor medida salud humana. El método de los rellenos sanitarios tiene un puntaje de 3 mpt, cuando la naturaleza empieza hacer efecto en las capas o lata protectora de la pila domestica empieza a segregar metales al medioambiente y estos llegan a las aguas subterráneas, con este método se observa el mayor impacto es en la salud humana, incrementando las causas de enfermedades y en una menor media en el ecosistema. Por último los procesos de reciclaje de pilas domesticas tiene un puntaje negativo de -8.5 mpt en el eco-indicador *récipe endpoint*, este método busca reincorporar el valor material de los componentes, siendo el método menos perjudicial para el medio ambiente, la salud de las personas y recursos.

Finalmente en SimaPro, tiene la opción de analizar los indicadores Minpoint, el cual se escogió el cambio climático en la salud humana y en el ecosistema. Esta tabla se basó en el anexo 3, cada anexo tiene implementado un método de disposición distinto.

Tabla 8: Comparación de cambio climático en el ecosistema y en la salud humana

	Incineración	Reciclaje	Relleno Sanitario
Pila Alcalina	56.1%	56.9%	56.7%
Camión	0.712%	0.723%	0.72%
Disposición	1.49%	-5.77%	0.387%
Caja	41.7%	42.3%	42.2%

Los tres métodos de disposición empleados en el análisis tiene un efecto diferente en el cambio climático, el método de incineración es el que mayor carga ambiental tiene en el ambiente, posteriormente le sigue el relleno sanitario, y finalmente el método de reciclaje fue el que menor puntaje dio, con un valor por debajo del 0%, indicando un beneficio medioambiental, ya que disminuye el potencial de calentamiento global que recibe el planeta, tiene menor impacto en el ecosistema y en la salud humana.

En cuanto al tercer objetivo presentado al inicio de este proyecto, se podría decir que gran parte de la información se puede sacar del objetivo dos, donde se tiene una serie de alternativas de recuperación y algunas de sus especificaciones, teniendo en cuenta otras consideraciones como datos y costos suministrados por la empresa Ecotec que se presentarán posteriormente.

En Colombia existen tratamientos de reciclaje de pilas Alcalinas y Zinc-Carbón, donde se implementan métodos de la pirometalurgia e hidrometalurgia para la separación y purificación de metales, pero en países como México se hizo una investigación que afirma que el proceso de la hidrometalurgia con algunas modificaciones en el uso de ácidos y otras sustancias, tiene ventajas al proceso de la pirometalurgia, generando la extracción de los compuestos de Zinc y Manganeseo como compuestos químicos, Además, afirman que este proceso es más económico que los métodos de la pirometalurgia, los cuales tiene un costo de 4080 USD/ton en comparación con un estimado de 500 USD/ton en la hidrometalurgia. (Ríos C. & Rojas N., 2008)

Cabe resaltar que como se ha venido diciendo anteriormente, la empresa Ecotec se encarga del aprovechamiento de las pilas usadas, casi en un 78% de lo que se recolecta por los diferentes sistemas de recolección o colectivos son pilas alcalinas y salinas las cuales pasan por un proceso de pirometalurgia donde interfieren subprocesos como trituración y segregación de componentes como metales ferrosos que sirven para el aprovechamiento nacional, la pasta negra de dióxido de zinc y manganeso para aprovechamiento en el exterior, plástico para el aprovechamiento nacional, finalmente la escoria como la fibra de cartón y plástico para su disposición final. (Ecotec S.A, 2016)

Ahora bien, según el anterior informe, se puede decir que en cuanto a condiciones económicas resulta mejor el método de la hidrometalurgia llamado Batenus, ya que se puede llevar a cabo el aprovechamiento de no solo las pilas alcalinas y salinas, sino también el tratamiento de las pilas como lo son las de litio, níquel cadmio, zinc carbono entre otras más; para las de níquel mercurio sería la excepción ya que según la literatura se debe tratar mediante un método pirometalúrgico (molienda al vacío).

El proceso de Batenus se podría decir que combina operaciones hidrometalúrgicas en un ciclo de reactivos casi cerrado que involucra técnicas electroquímicas y de membrana. Básicamente, se hace una separación mecánica de los materiales como metales ferrosos, no ferrosos, papel y plásticos. Posteriormente, a través de la hidrometalurgia se logra hacer la recuperación de zinc, cobre, níquel y cadmio, además de otros productos como carbonato de manganeso.

Se podría decir qué como resultado de diseño del proceso Batenus, los pasos individuales pueden modificarse fácilmente para adaptarse a las variaciones en los contenidos de las materias primas secundarias. Promover las aplicaciones de esta tecnología altamente flexible están planificadas para el futuro. Una importante característica de Batenus es su economía en cuanto al requerimiento de energía. El consumo energético promedio para una planta que procesa 7500 toneladas por año es de aproximadamente 2500 kWh / tonelada de baterías; haciendo una comparación con el requisito promedio de energía eléctrica específica para ganar los principales productos del proceso (zinc, cobre, níquel, cadmio, hierro, chatarra no ferrosa, carbonato de manganeso y oxido de manganeso) que es de aproximadamente 4125 kWh / t de baterías.

Una comparación con figuras conocidas de fundiciones primarias pirometalúrgicas no ferrosas, tales como: 4100 kWh / t de zinc electrolítico fino, 3150 kWh / t de zinc cobre electrolítico, o 3400 kWh / t de hierro. Esto deja claro que el proceso Batenus conduce a un aceptable balance de energía con respecto a la recuperación de metales para usarse como materias primas.(Fröhlich & Sewing, 1995).

La primera operación mecánica es filtrar el botón células, esas células se envían a una compañía de recuperación de mercurio. En una unidad se estancan las baterías y se trituran, en la trituradora de salida un imán se aproxima para atraer la chatarra y después eliminarla; después del lavado, esta chatarra se vende a un distribuidor de chatarra, tanto papel, plásticos como metales no ferrosos están separados del contenido de la batería con la ayuda de tamices. Una separación adicional produce una porción de papel / plástico y una porción de chatarra no ferrosa. El contenido de la batería se muele para obtener un polvo que se dirige a la unidad hidrometalúrgica.

Una vez pulverizado el contenido de la batería se lixivia en ácido sulfúrico, cualquier gas de escape potencialmente resultante se limpia en un depurador posteriormente, la suspensión de lixiviación se filtra.

La torta filtrada recuperada, que consiste principalmente en óxido de manganeso negro de humo, se lava y se seca, este producto es vendido a un productor de ferromanganeso, el filtrado se limpia de trazas de mercurio mediante un intercambiador de iones selectivo. el zinc se extrae de la solución de proceso libre de mercurio en una extracción solvente de varios pasos. Despojando así de lo orgánico la fase con ácido sulfúrico produce una solución pura de sulfato de zinc a partir de la cual se genera metal de zinc electrolíticamente.

El cobre, el níquel y el cadmio se separan sucesivamente de la solución mediante intercambiadores iónicos selectivos; las resinas son eluidas por ácido sulfúrico produciendo soluciones del sulfato correspondiente, los metales puros se recuperan por electrólisis y la concentración de hierro debe controlarse en níquel o eludirlo si es necesario, se elimina el hidróxido de hierro. En esta etapa, la solución de proceso principal contiene solo manganeso y sulfato de metal alcalino (así como pequeñas cantidades de cloruro). La adición de carbonato de sodio produce un manganeso precipitado de carbonato, el cual se filtra, se deja secar y después es lavado con agua, este producto se puede comercializar como materia prima para la producción de manganeso o dióxido de manganeso. (Fröhlich & Sewing, 1995)

Para finalizar, se podría concentrar el tema de la logística reversiva enfocada en una empresa, para así obtener una visión en una pequeña escala. La empresa Nacional de Pilas de Occidente, ubicada en la vía Cali- Yumbo, tienen proyectado una recolección de pilas para el presente año de 82 Toneladas, de las cuales ya se han entregado a Ecotec alrededor de 31 Toneladas para su disposición final, aprovechamiento o exportación de estas, representado casi un 38% de recolección. Aunque en el momento no se encuentra información exacta de recolección de pilas usadas para Colombia en los últimos años, se podría creer que desde la legislación se han estado recuperando alrededor de 3000 toneladas a 3500 toneladas por año, teniendo en cuenta el estudio que se realizó por el ministerio de ambiente y desarrollo sostenible.

5.1 Conclusiones

- El cumplimiento de las metas de reciclaje y recolección exigidas por el gobierno es únicamente responsabilidad de los fabricantes e importadores, sin contar que entre los consumidores no existe una educación y cultura ambiental que optimice los resultados e indicadores de las plantas de tratamiento de pilas domésticas y el cuidado al medio ambiente.
- A lo largo del proyecto se determinó que las pilas usadas tiene tres posibles finales, como lo son el de incineración, el de relleno sanitario y el más importante el de reciclaje. Según las ilustraciones extraídas de la herramienta Simapro, el reciclaje es la mejor alternativa que se puede presentar ya que su impacto ambiental es mucho menor que en incineración y relleno, por lo que se puede aprovechar nuevamente los recursos, sin una alta propagación de contaminación como es el caso de la incineración.
- Colombia cuenta con plantas de tratamiento y reciclaje de pilas primarias, sin embargo, en estas plantas no se tratan todos los tipos de pilas primarias, solo se manejan las pilas Alcalinas, Zinc-Carbón. Se necesita diversificar en nuevas tecnologías que valoricen y reintegren a todas las pilas que ingresan al país cumpliendo con los estándares de calidad, y protección al medio ambiente. Por tal motivo se concluye que el método más adecuado para el tratamiento de pilas es el Batenu de la hidrometalurgia ya que contiene procesos muy detallados que permiten hacer la extracción de materia de diferentes componentes simultáneos que pueden ser reutilizados en la fabricación de sales minerales, grafito para lápices e inclusive fertilizantes para la agricultura.

5.2 Recomendaciones

- **Recomendaciones a la empresa o sector de aplicación:** Invertir en nuevas tecnologías para la disposición final de las pilas domesticas es la mejor opción en términos ambientales, ya que se recupera su valor material que es nuevamente reincorporado al ciclo de producción, en comparación con los métodos tradicionales que no generan ningún valor agregado al sistema económico ni ambiental.

Recomendaciones para investigaciones futuras: determinar el costo que podría involucrarse en la implementación del proceso de la hidrometalurgia propuesto para el aprovechamiento de diferentes pilas usadas sin importar sus componentes, ya que es un proceso de flexibilidad al cambio

6 Bibliografía

- ANDI. (2010). Pilas con el Ambiente. Retrieved from https://www.pilacolombia.com/el_programa
- Bernardes, A. M., Espinosa, D. C. R., & Tenório, J. A. S. (2004). Recycling of batteries: A review of current processes and technologies. *Journal of Power Sources*, 130(1–2), 291–298. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2003.12.026>
- Bigum, M., Petersen, C., Christensen, T. H., & Scheutz, C. (2013). WEEE and portable batteries in residual household waste: Quantification and characterisation of misplaced waste. *Waste Management*, 33(11), 2372–2380. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.05.019>
- Das, E., Das, S., & Lotação, U. D. E. (2013). Anexo iv, 2013.
- Ecotec S.A. (2016). No Title. Cali.
- Ehrlich, G. M. (2002). *Lithium-Ion Batteries. Handbook of Batteries*. [https://doi.org/10.1016/0378-7753\(86\)80059-3](https://doi.org/10.1016/0378-7753(86)80059-3)
- ELMUNDO. (2014, May 7). La OMS alerta del aumento de la contaminación ambiental en las ciudades. Retrieved from <http://www.elmundo.es/salud/2014/05/07/536a6608ca4741fe0d8b4573.html>
- Fröhlich, S., & Sewing, D. (1995). The BATENUS process for recycling mixed battery waste. *Journal of Power Sources*, 57(1–2), 27–30. [https://doi.org/10.1016/0378-7753\(95\)02234-1](https://doi.org/10.1016/0378-7753(95)02234-1)
- Greenpeace Argentina. (2010). y BateriasGestion de Residuos de Pilas y Baterias. *Compañía Contra La Contaminación*, 42. Retrieved from <http://www.greenpeace.org/argentina/Global/argentina/report/2010/7/informe-gestion-pilas-baterias.pdf>
- INTI. (2016). Gestión de pilas y baterías eléctricas en Argentina. INTI. Retrieved from <https://www.inti.gob.ar/ambientesg/pdf/pilasybaterias2016.pdf>
- Ministerio de Ambiente vivienda y desarrollo territorial. (2010). Resolucion 1297 de 2010. Por la cual se establecen los sistemas de recoleccion selectiva y gestion ambiental de residuos de pilas y/o acumuladores y se adoptan otras disposiciones. Retrieved from <https://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article/249-plantilla-asuntos-ambientales-y-sectorial-y-urbana-sin-galeria-15#resoluci>
- Sun, M., Yang, X., Huisingh, D., Wang, R., & Wang, Y. (2015). Consumer behavior and perspectives concerning spent household battery collection and recycling in China: A case study. *Journal of Cleaner Production*, 107, 775–785.

<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.081>

Symposium, I. D., International, D., Harmony, M., Mind, Y., Free, F., & Annals, B. (2012). System for Collecting and Recycling of Used Batteries and, 23(1), 751–756.

Tetsopgang, S., & Kuepouo, G. (2008). Quantification and characterization of discarded batteries in Yaounde, from the perspective of health, safety and environmental protection. *Resources, Conservation and Recycling*, 52(8–9), 1077–1081. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2008.04.006>

ANEXOS

Anexo 1. Preguntas para empresas-ciclo post consumo

Las siguientes preguntas van dirigidas a todas las empresas que tienen relación con las pilas domésticas y qué planes tiene con los procesos de post-consumo de este producto:

1. ¿Cuál o cuáles son los operadores logísticos autorizados para el manejo de las pilas desechadas?
2. ¿Qué sucede con las pilas usadas después de haber sido recogidas en los centros de acopio?
3. ¿Se realiza algún tratamiento o separación a las pilas recolectadas?
4. ¿Qué métodos de reutilización o aprovechamiento se utilizan? se recuperan materiales?
5. ¿Cuál sería el destino final de los materiales que se pudieron recuperar?
6. ¿Cuál sería el destino final de los materiales que NO se pudieron recuperar?

Link de la encuesta:

<https://docs.google.com/forms/d/11RYoUNcUe1JpA6XZjqd5hhxks6LjwACoU0KPPM8W-uY/edit>

Anexo 2. Base de datos Legis Comex-Characterización de pilas

Archivo de Excel adjunto a Ms Word

Anexo 3. Gráficos Caracterización indicador Minpoint.

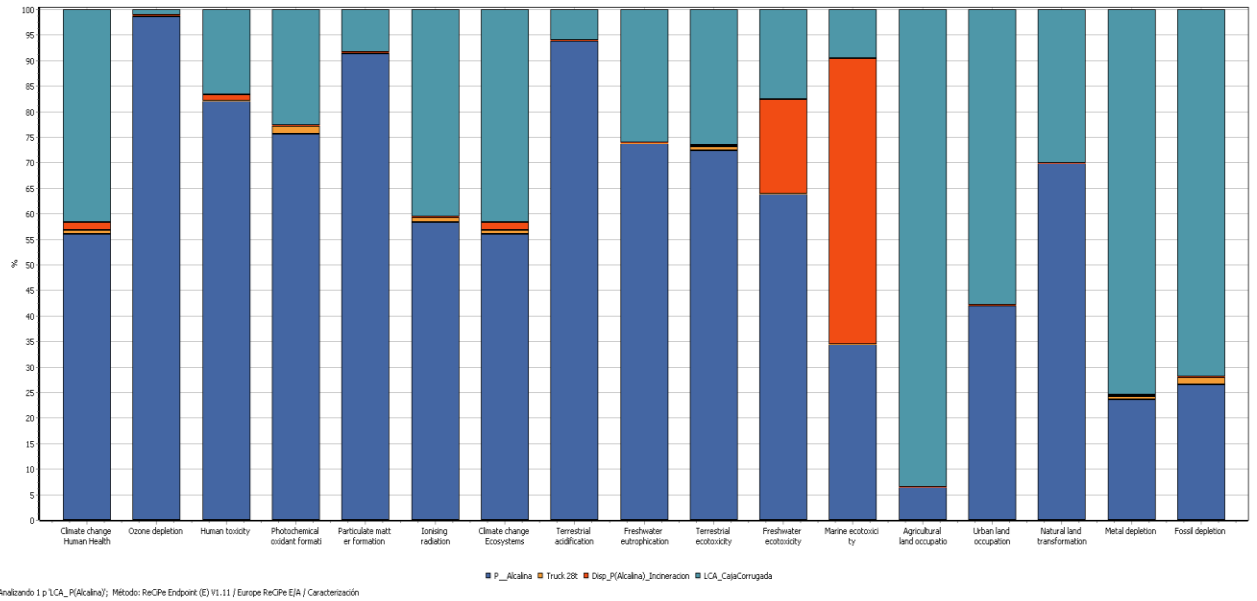


Ilustración 10: Indicadores Minpoint Pila Alcalina – Incineración

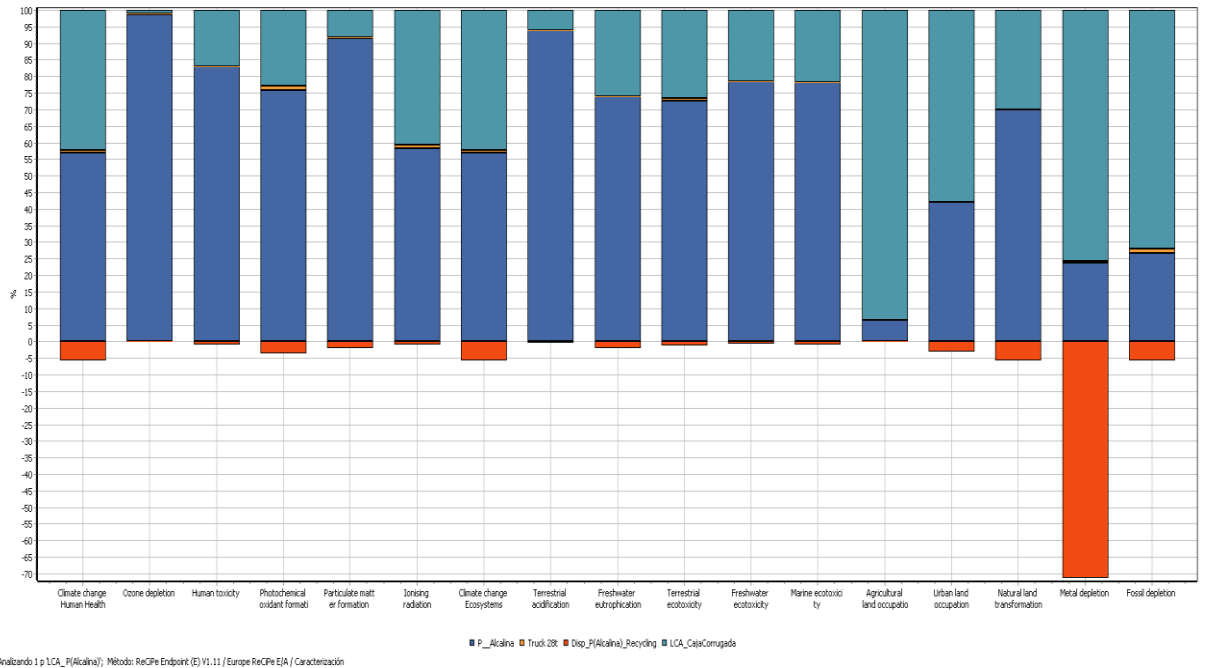


Ilustración 11: Indicador Minpoint Pila Alcalina - Reciclaje

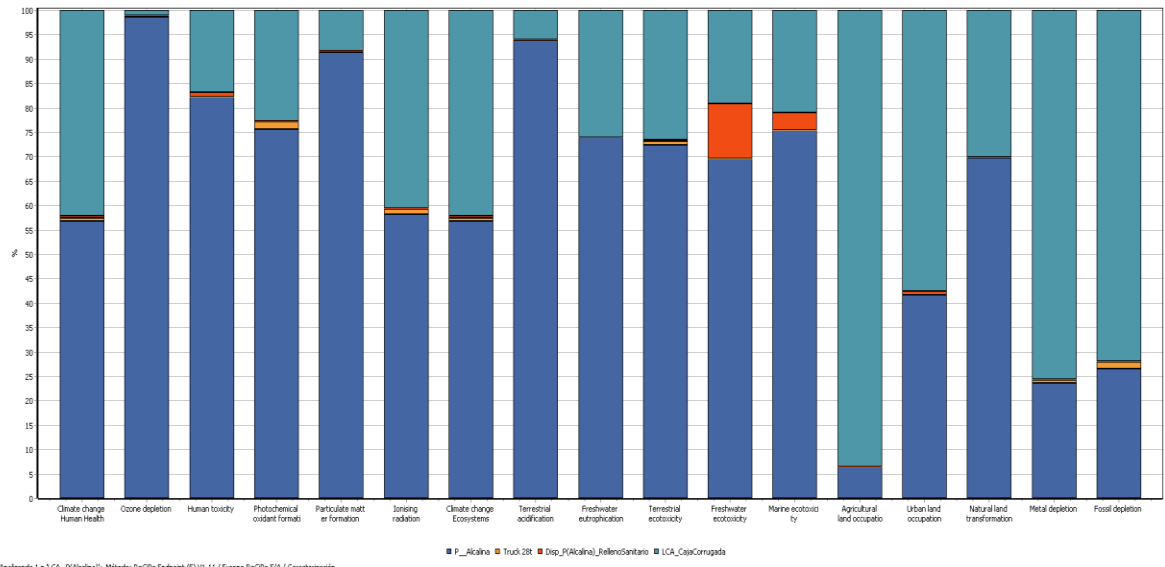


Ilustración 12: Indicador Minpoint pila Alcalina - Relleno sanitario