

**POTENCIAL DE LA MINERÍA INVERSA PARA LA RECUPERACIÓN DE MATERIALES  
CRÍTICOS (REEs)**

**MARÍA CLARA GIRALDO REBOLLEDO  
PATRICIA PAZ GUZMÁN**

**UNIVERSIDAD ICESI  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL  
CALI  
SEPTIEMBRE 2015**

**POTENCIAL DE LA MINERÍA INVERSA PARA LA RECUPERACIÓN DE MATERIALES  
CRÍTICOS (REEs)**

**MARÍA CLARA GIRALDO REBOLLEDO  
PATRICIA PAZ GUZMÁN**

**Proyecto de Grado para optar el título de Ingeniero Industrial**

**Director proyecto  
KATHERINE ORTEGÓN MOSQUERA**

**UNIVERSIDAD ICESI  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL  
CALI  
SEPTIEMBRE 2015**

<b>Contenido</b>	<b>Pág.</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>7</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>9</b>
<b>1 CAPÍTULO I. Definición del Problema</b> .....	<b>10</b>
1.1 Contexto del Problema.....	10
1.2 Análisis y Justificación.....	11
1.3 Formulación del Problema .....	14
<b>2 CAPITULO II. Objetivos</b> .....	<b>15</b>
2.1 Objetivo General.....	15
2.2 Objetivo del Proyecto .....	15
2.3 Objetivos Específicos .....	15
<b>3 CAPÍTULO III. Marco de Referencia</b> .....	<b>16</b>
3.1 Antecedentes o Estudios Previos.....	16
3.1.1 Solvay.....	16
3.1.2 Umicore.....	17
3.1.3 ERAMET .....	18
3.1.4 Japan Metals & Chemicals Co., Ltd. ....	18
3.2 Marco Teórico.....	19
3.2.1 Logística Reversiva .....	19
3.2.2 Minería Inversa .....	19
3.2.3 Materiales Críticos .....	19
3.2.4 Tierras Raras.....	20
3.2.5 Técnicas de Pronósticos.....	20
3.2.6 Vida Útil.....	21
3.2.7 Vida Estética.....	21
3.2.8 Obsolescencia.....	21
3.2.9 Residuos electrónicos en Colombia.....	22
<b>4 CAPÍTULO IV. Metodología</b> .....	<b>23</b>
4.1 Gestión del Proyecto de Investigación.....	23

4.2	Metodologías de Análisis.....	25
<b>6</b>	<b>TÍTULO V. Resultados .....</b>	<b>26</b>
6.1	Análisis de resultados.....	26
6.1.1	Caracterización de los diferentes materiales críticos existentes.....	26
6.1.2	Alternativas para disminuir el impacto de la explotación y disposición de materiales críticos .....	38
6.1.4	Potencial de la minería inversa en Colombia .....	49
6.2	Conclusiones .....	65
6.3	Recomendaciones .....	67
	<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>69</b>
	<b>ANEXOS .....</b>	<b>76</b>

## Lista de Figuras

Figura 1. Precio de diversos materiales críticos en 2007, 2008 y 2010 (Jha, 2014).....	12
Figura 2. Resumen de las causas y consecuencias asociadas al problema de estudio..	13
Figura 3. Metodología de investigación .....	23
Figura 4. Cronograma de la investigación.....	24
Figura 5. Abundancia de las tierras raras en la tierra, los océanos y las rocas de la corteza (American Elements, 2015).....	27
Figura 6. Comparación de los escenarios de las proyecciones de la demanda para tierras raras (Alonso et al., 2012) .....	34
Figura 7. Producción en minas y reservas de tierras raras por país (ELSEVIER, 2015) .....	36
Figura 8. Localización de los depósitos de tierras raras (Castor, S., & Hedrick, J., 2009) .....	37
Figura 9. Cantidad de importaciones en unidades de productos que contienen REEs en Colombia (Adaptado de LEGISCOMEX, 2015) .....	50
Figura 10. Proyecciones de inventarios de pilas (Adaptado de LEGISCOMEX, 2015)..	51
Figura 11. Proyecciones de inventarios de portátiles (Adaptado de LEGISCOMEX, 2015) .....	51
Figura 12. Proyecciones de inventarios de celulares (Adaptado de LEGISCOMEX, 2015) .....	52
Figura 13. Escenarios Baterías .....	54
Figura 14. Cantidad de REEs a recuperar por producto de acuerdo a la demanda anual .....	55
Figura 15. Cantidad de REEs a recuperar por producto de acuerdo a la demanda anual sin tener en cuenta las baterías.....	55
Figura 16. Comparación entre la demanda y la cantidad a recuperar (Toneladas) de REEs en pilas .....	57
Figura 17. Comparación entre la demanda y la cantidad a recuperar (Toneladas) de REEs en celulares.....	58
Figura 18. Comparación entre la demanda y la cantidad a recuperar (Toneladas) de REEs en pilas .....	58
Figura 19. Comparación entre la demanda y la cantidad a recuperar (Toneladas) de REEs en las categorías imanes permanentes y aleaciones de metales/baterías .....	59
Figura 20. Destino final de las importaciones de productos que contienen REEs en Colombia (Adaptado de LEGISCOMEX, 2015) .....	60
Figura 21. Localización de las REEs a recuperar en Colombia (Adaptado de LEGISCOMEX, 2015).....	61

## **Lista de Tablas**

Tabla 1. Propiedades de las Tierras Raras (American Elements, 2015) (Schüler et al, 2011) .....	30
Tabla 2. Posibles fuentes presentes y futuras para el reciclaje de REEs de productos en proceso (Binnemans et al, 2013).....	31
Tabla 3. Posibles fuentes presentes y futuras para el reciclaje de REEs de productos terminados (Binnemans et al, 2013) (Schüler et al, 2011) .....	32
Tabla 4. Resumen de las alternativas de recuperación de las tierras raras.....	46
Tabla 5. Vida útil de los productos.....	57
Tabla 6. Empresas en Barranquilla que realizan actividades de recuperación de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEEs) (Raee.org.co, 2014) .....	62
Tabla 7. Empresas en Bogotá que realizan actividades de recuperación de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEEs) (Raee.org.co, 2014) .....	62
Tabla 8. Empresas en Cali que realizan actividades de recuperación de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEEs) (Raee.org.co, 2014) .....	62
Tabla 9. Empresas en Cartagena que realizan actividades de recuperación de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEEs) (Raee.org.co, 2014) .....	63
Tabla 10. Empresas en Medellín que realizan actividades de recuperación de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEEs) (Raee.org.co, 2014) .....	63

## **Lista de Anexos**

<b>Anexo 1. Archivos complementarios.....</b>	<b>76</b>
---	-----------

## RESUMEN

Hoy en día existe un grupo de 17 elementos químicos (*lanthanum, cerium, praseodymium, neodymium, promethium, samarium, europium, gadolinium, terbium, dysprosium, holmium, erbium, thulium, ytterbium, lutetium, scandium e yttrium*) conocidos como tierras raras, pertenecientes a un grupo más grande llamado materiales críticos. Estos materiales son muy importantes, ya que cuentan con propiedades catalizadores, conductivas, eléctricas, mecánicas, ópticas, térmicas, químicas, radioactivas y magnéticas, por lo que son usados en una gran variedad de aparatos tecnológicos como celulares y laptops, al igual que en turbinas eólicas, carros eléctricos o híbridos, baterías, entre otros. Por todo lo anterior, la demanda de los mismos se encuentra en aumento, pero las condiciones de producción y explotación son delicadas, ya que China cuenta con el 90% de la producción de las mismas, controlando el mercado por medio de dicho monopolio; así mismo las fuentes para la explotación de las tierras raras son limitadas, difíciles de encontrar, y muy costosas en términos de infraestructura.

Como consecuencia, actualmente se están investigando alternativas para la recuperación de estos elementos desde los productos que ya hayan terminado su vida útil o estética, o que hayan sido desechados durante el proceso productivo. Sin embargo, muy pocas de estas iniciativas se encuentran implementadas a escala industrial. Dichas alternativas se pueden clasificar por el tipo de producto o aplicación, catalogados de la siguiente manera: imanes permanentes; fósforos y luminiscencia; aleaciones de metales o baterías; catalizadores; y vidrio, pulido y cerámica. De todos los anteriores los únicos que se encuentran a escala industrial son los bombillos fluorescentes y las baterías, sin embargo para los imanes permanentes hay un proyecto de inversión.

Después de analizar cada uno de los casos anteriores se concluyó que en este momento el proceso de recuperación más llamativo para la industria es el de la hidrometalurgia para los imanes permanentes, dicha tecnología se encuentra en un estado maduro, a escala de laboratorio, pero en proyecto de inversión para industrializarlo con la compañía Rhodia.

Para el contexto colombiano se encontró que la mejor alternativa de recuperación a aplicar sería también la hidrometalurgia para los imanes permanentes, ya que estos se encuentran en productos que tienen una alta demanda, como por ejemplo los portátiles que tiene un crecimiento exponencial en Colombia. Así mismo tienen un alto

porcentaje de recuperación y a futuro sería una inversión mucho más favorable, pues productos como las baterías NiMH se están dejando de utilizar debido a la entrada al mercado de las que se hacen con litio, que tienen mayor vida útil, entre otras ventajas. Inicialmente se recuperarían materiales de portátiles y celulares, pero luego se pueden añadir otros productos que contengan imanes permanentes.

**Palabras clave:** REEs, tierras raras, materiales críticos, minería inversa, reciclaje, recuperación de recursos.



## INTRODUCCIÓN

Actualmente existe un grupo de 17 elementos químicos conocidos como tierras raras, el cual tiene una gran importancia debido a la gran cantidad de propiedades que poseen, como por ejemplo eléctricas, conductivas, ópticas, magnéticas, radioactivas, entre otras, y en las cuales destacan debido a su alto rendimiento. Por esto la demanda de dichos materiales es muy alta. Sin embargo su oferta y aprovisionamiento se encuentra en riesgo, debido a que se identifica un monopolio de abastecimiento controlado por China. Igualmente se debe tener en cuenta que las minas destinadas a la explotación de las tierras raras son limitadas, difíciles de encontrar, y su costosa infraestructura tarda varios años en ser construida.

Es por esto que el objetivo de este proyecto es caracterizar la recuperación de los materiales críticos, específicamente las tierras raras. Esto con la intención de analizar el potencial que tiene la minería inversa para la recuperación de las mismas (en términos de cantidad), teniendo como objetivo el contexto colombiano. Para lograr esto se deben caracterizar las diferentes tierras raras existentes, identificar las alternativas que permiten disminuir el impacto que tiene la explotación y disposición de estos materiales y, finalmente, estimar el potencial de la minería inversa en Colombia.

Para la realización de este trabajo se hizo una extensa revisión de bibliografía, contando con información de fuentes de varios estudios y países, con lo que se hizo un análisis comparativo entre las alternativas de recuperación encontradas; dicha información se organizó en tablas en Excel, para poderla filtrar y clasificar. Así mismo se recolectaron datos de las importaciones de los productos en cuyos componentes se podían encontrar tierras raras; con esto se pudo encontrar la cantidad y tipo de productos que entran al país, al igual que los departamentos a los que se dirigen. La información anterior fue proyectada al año 2025, para luego determinar la cantidad de materiales que se podría recuperar en el país a mediano plazo.

Uno de los retos presentados fue establecer el potencial de la minería inversa en Colombia pues los estudios y los proyectos existentes están aplicados a países con contextos muy diferentes a los presentados en el país como es la cultura, la economía, el nivel y el desarrollo tecnológico. Los últimos dos mencionados destacan significativamente en países como Alemania y Japón, lugares donde se han realizado varios estudios, e implementado a escala industrial y/o de laboratorio.

# 1 CAPÍTULO I. Definición del Problema

## 1.1 Contexto del Problema

Hoy en día existe un grupo de 17 elementos químicos, de los cuales 15 pertenecen al grupo de los lantánidos (*lanthanum, cerium, praseodymium, neodymium, promethium, samarium, europium, gadolinium, terbium, dysprosium, holmium, erbium, thulium, ytterbium* y *lutetium*) acompañados de *scandium* e *yttrium*, que se conocen como tierras raras, pertenecientes a un grupo más grande llamado materiales críticos. Estos han ganado una gran importancia en el transcurso del tiempo debido a que se han convertido en un puente para pasar a una economía verde, baja en carbono, ya que se usan en productos como: imanes permanentes, fósforos para bombillos fluorescentes, baterías de níquel-metal hidruro recargables, entre otros. Además de estos usos, son requeridos para la producción de la tecnología como la conocemos hoy en día.

Actualmente China controla el monopolio de los materiales críticos, pues produce el 90% de todas las tierras raras (Binnemans, K., Jones, P. T., Blanpain, B., Gerven, T. V., Yang, Y., Walton, A., & Buchert, M., 2013). Esto ha conducido a diversos conflictos económicos y políticos, ya que está manejando y controlando el precio de venta de estos materiales libremente; al igual que amenaza con detener la exportación, especialmente a países como los Estados Unidos y Japón a causa de los conflictos políticos presentes. Del 2009 al 2012 se ha reducido la exportación de 50.145 a 31.130 toneladas, es decir 62,07% (Binnemans et al., 2013). Sin embargo, la demanda va aumentando drásticamente, se estima que en los próximos 25 años se incremente la demanda mundial de neodymium y dysprosium en un 700% y 2600% respectivamente (Alonso, E., Sherman, A.M., Wallington, T.J., Everson, M.P., Field, F.R., Roth, R., Kirchain, R.E., 2012). El aumento de la demanda se debe a diversas causas, no sólo la evolución y desarrollo tecnológico mencionado con anterioridad, sino también el crecimiento demográfico y económico alrededor del mundo; muchas personas entrarán en la clase media y se verán en condiciones y con el deseo de adquirir diversos productos tecnológicos.

Debido a esto muchos países han enfocado sus esfuerzos en la minería, buscando e instalando infraestructura en diferentes minas para empezar la explotación y producción de materiales críticos y detener el monopolio controlado por China.

Todo lo anterior muestra que se está haciendo un gran esfuerzo por entrar en el mercado, romper el monopolio existente y garantizar el abastecimiento de materiales críticos. Como respuesta a lo anterior se han planteado las opciones de sustitutos y la minería inversa, ésta última consiste en extraer materiales críticos de los diferentes productos ya existentes en el mercado que han agotado su vida útil o han sido descartados, así mismo se pueden minar dichos materiales de los desechos que surgen durante los procesos productivos y de productos rechazados por cuestiones de calidad, ya sea por la empresa productora o el cliente. Sin embargo, es evidente que las acciones se centran en la búsqueda y explotación de minas alrededor del mundo en vez de recurrir a las alternativas más sostenibles que disminuyan el daño que causa la explotación, uso y disposición de materiales críticos y los productos que a partir de ellos se fabrican. De hecho, en el 2011 solamente el 1% de los materiales críticos se han reciclado (Binnemans et al., 2013), esto se da principalmente por la falta de incentivos, incluso cuando se cuentan con varias investigaciones realizadas en laboratorios.

## **1.2 Análisis y Justificación**

Inicialmente se debe analizar la evidente importancia de estos materiales en el mundo actual. A partir de estos se producen y fabrican la mayoría de aparatos tecnológicos usados en la actualidad, esta demanda sólo irá aumentando con el paso de los años, no solo por la presente dependencia que se tiene de ellos, sino también por un crecimiento demográfico que se ha pronosticado. Con éste se incrementará también la economía y el poder adquisitivo de varios grupos de personas, que al entrar en clase media podrán satisfacer sus deseos y necesidades, adquiriendo diversas herramientas que antes no demandaban.

El monopolio controlado por China es una situación que muchos países desean atacar, el gran país asiático cuenta sólo con el 40% de las reservas conocidas y posee el 90% de la producción (Binnemans et al., 2013). Con el pasar del tiempo han reducido cada vez más las exportaciones, al igual que controlan el precio del mercado de los diferentes materiales, el cual ha tenido un aumento considerable cada año (Figura 1. ). China no tiene ninguna vacilación a la hora de utilizar su posición como un apalancamiento político, amenazando con detener las exportaciones a los Estados Unidos, Japón y países Europeos si empeora la situación política con ellos (Jha, 2014).

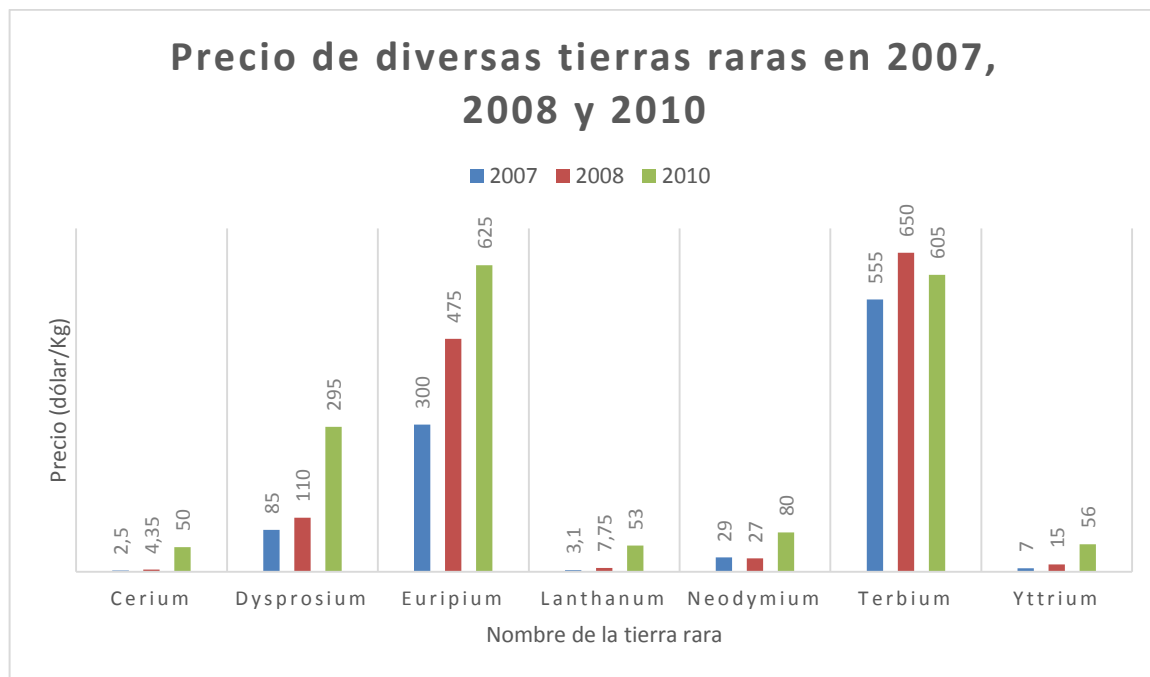


Figura 1. Precio de diversos materiales críticos en 2007, 2008 y 2010 (Jha, 2014).

Por todo lo anterior los Estados Unidos y Japón han adquirido reservas de materiales críticos para los próximos 30 a 40 años, especialmente por las aplicaciones que se tienen en productos de defensa. De igual manera estos dos países junto con Afganistán, Brasil, India, Sur África y Australia han realizado grandes esfuerzos para desarrollar operaciones de minería, entre los cuales se pueden destacar varios proyectos que hoy en día se encuentran bastante avanzados, como por ejemplo Mountain Pass (Estados Unidos), Dubbo Zirconia Project (Australia), Zeus Kipawa, Nechalacho y Strange Lake (Canadá) y Steenkampskraal (Sur África). Así mismo gracias a los esfuerzos realizados por Japón para descubrir depósitos de estos materiales bajo el agua, geólogos japoneses han encontrado grandes depósitos en el fondo del mar del pacífico, en aguas internacionales cerca de Tahití y Hawái a una profundidad de 11.500 a 200.000 pies; se cree que estos pueden exceder los 100 billones de toneladas.

Diferentes expertos científicos y mineros consideran que se tarda entre 8 y 10 años en conseguir los diversos estudios, declaraciones ambientales y análisis financieros antes de poder confirmar que una mina es realmente una fuente de aprovisionamiento de estos materiales. Así mismo una vez se han probado las reservas, si no se cuenta con ninguna infraestructura se estima que se tarda entre 3 y 5 años para lograr la primera producción de uno o más depósitos. Es aquí donde se puede preguntar si esta inversión es igual a la que se haría para desarrollar una industria de minería inversa,

cuánto se puede tardar en montar las instalaciones, obtener los equipamientos e iniciar operaciones de esta última. Como ya se había mencionado, para lograr la primera producción de una mina se requieren de 11 a 15 años, de aquí surge otro argumento que recalca la importancia de analizar una alternativa más sostenible, que puede llegar a alcanzar resultados similares en términos productivos, los cuales podrían lograrse en un periodo de tiempo inferior, pero que además reducen el impacto ambiental resultante de la explotación, producción, uso y disposición de materiales críticos y sus productos asociados.

En cuanto a los sustitutos, constantemente se analiza la posibilidad de encontrar alguna alternativa para estos materiales por algunos menos críticos, sin embargo estos se encontrarían en la misma familia o grupo, por lo que el impacto ambiental no se vería reducido. Además, a largo plazo, se llegaría al mismo inconveniente que se tiene actualmente con los materiales críticos, pues son recursos naturales no renovables. Así mismo, aunque se tengan propiedades similares y compartan algunas aplicaciones, nunca serían igual de eficientes, no tendrían el mismo desempeño, ni sustituirían todos los usos que se le dan a las tierras raras, especialmente en el campo de la defensa, donde las especificaciones son muy rígidas.

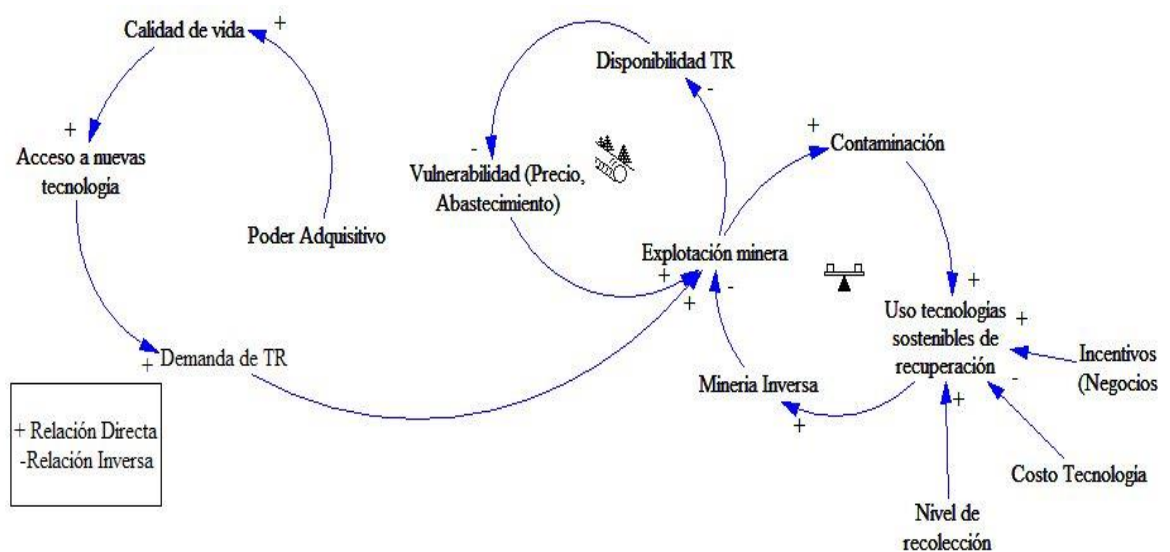


Figura 2. Resumen de las causas y consecuencias asociadas al problema de estudio

### **1.3 Formulación del Problema**

Desconocimiento o falta de apropiación de prácticas sostenibles para la recuperación de materiales críticos (REEs) requeridos para la manufactura de diversos productos, que pueden suplir la creciente demanda y reducir el impacto ambiental de la extracción, producción, uso y disposición de dichos materiales.

## **2 CAPITULO II. Objetivos**

### **2.1 Objetivo General**

Identificar alternativas para la recuperación de materiales críticos a partir de minería inversa.

### **2.2 Objetivo del Proyecto**

Caracterizar la recuperación de los materiales críticos (REEs) a partir de minería inversa.

### **2.3 Objetivos Específicos**

Objetivos Específicos:

- Caracterizar los diferentes materiales críticos (REEs) existentes.
- Identificar las diversas alternativas para disminuir el impacto que tiene la explotación y disposición de los materiales críticos (REEs).
- Estimar el potencial de la minería inversa en Colombia.

Entregables:

- Materiales y propiedades identificados.
- Aplicaciones en la industria determinadas.
- Demanda, oferta y localización del mercado proyectada.
- Sustitutos de materiales críticos identificados.
- Alternativas de recuperación identificadas.
- Los pros y los contras de las alternativas analizadas y evaluadas.
- Alternativas factibles para la industria de recuperación seleccionadas.
- Inventario disponible por consumo y oferta determinado.
- Potencial de la recuperación en Colombia cuantificado.
- Aspectos logísticos y geográficos identificados.
- Oportunidades de negocio sobre dichas alternativas en Colombia analizadas.

## 3 CAPÍTULO III. Marco de Referencia

### 3.1 Antecedentes o Estudios Previos

#### 3.1.1 Solvay

Es una empresa multinacional creada en 1863 con sede principal en Bruselas (Bélgica), pertenece al sector químico-físico y farmacéutico. Busca encontrar respuestas y responder a los desafíos de la creciente escasez de recursos, población en crecimiento, cambio climático, salud sustentable y bienestar. Dentro sus compañías, también se encuentra *Rhodia*, cuya marca en algunos casos ha sido sustituida para reafirmar la consolidación de todo el grupo.

Esta compañía está abriendo dos unidades de reciclaje de tierras raras en Francia (Saint-Fons, Rhône-Alpes y La Rochelle, Charente Maritime), con el fin de diversificar las fuentes de abastecimiento y preservar los recursos. Solvay ha desarrollado un proceso para la recuperación de productos como bombillas de bajo consumo, baterías e imanes; cuando llegan al fin de su vida.

Se inició con las bombillas de bajo consumo ya que los canales de recolección ya existían, además que este producto posee grandes cantidades de seis diferentes tierras raras (Lanthanum, Cerium, Terbium, Yttrium, Europium y Gadolinium) y Solvay, con el proceso de reciclaje, logra el 100% de sus propiedades funcionales. Empiezan con la recolección de las bombillas, cada parte es procesada por una compañía especializada en sus diferentes componentes como vidrio y plástico, mientras que los polvos luminiscentes (donde se encuentran las tierras raras) son enviados a Solvay para ser tratados correctamente (Solvay, 2014).

En el ámbito de las tierras raras Solvay se encuentra trabajando en el Proyecto Ciclo de Vida, éste inició en 2007, se realizó la investigación y el desarrollo necesario durante dos años, luego otros dos años de industrialización, para finalizar con la decisión de hacer la inversión en el 2011. Con este proyecto se espera hacer los tratamientos de procesos de más de 1000 toneladas por año de desechos peligrosos; una valorización de la corriente de hasta un 90% de la siguiente manera: del 10 al 20% de óxidos de tierras raras (por ejemplo Europium, Terbium y Yttrium), 10 al 50% de vidrio (por producto a valorizar) y de un 70 a 80% de fosfato (por producto a valorizar); así mismo quieren reducir los derechos por un factor de 10; implementar un proceso industrial reusando equipo existente en las plantas Saint-Fons y La



Rochelle; y finalmente procesar más de 3000 toneladas por año de desperdicio como objetivo del proyecto al final de la industrialización a gran escala (Solvay, 2014).

### **3.1.2 Umicore**

A partir de 2001 Umicore, antiguamente Unión Minera por su traducción del francés, es una compañía multinacional en el sector de tecnología de materiales (desde el refinamiento hasta el reciclaje de materiales preciosos y críticos, pasando por la manufactura de productos a base de estos metales a partir de su constitución en 1989 por la fusión de cuatro compañías de la industria minera y de la fundición. Su misión: "Materiales para una mejor vida". Umicore tiene una sede principal en Bruselas, Bélgica, sucursales en Brasil (en Manaus, Guarulhos y Americana), otra en Edmonton, Canadá y en otros 35 países más (Caffarey, M., 2012).

Umicore tiene cuatro focos principales, que son tendencia en el mundo actual: carros eléctricos, escasez de recursos, control de emisiones y energía renovable. Utilizan estrategias como la transformación de materiales en alta tecnología, la aplicación de la creación de soluciones a la medida en conjunto con la colaboración de sus clientes, asegurando el abastecimiento reciclando la producción de desperdicios al final de su vida y minimizando el impacto ambiental (Caffarey, M., 2012).

La estructura tiene cuatro pilares: energía de materiales, reciclaje, catálisis y desempeño de materiales, y dentro de estos se encuentran los procesos y las especialidades para cada tipo de material dependiendo de su tratamiento y uso (Caffarey, M., 2012).

En cuanto a las tierras raras, ellos establecieron el porcentaje de aplicación o el porcentaje en que estos materiales se dividían en las aplicaciones (aproximadamente 11% en electrónicos, 13% en auto-catalizadores, 32% en ópticos, 7% herramientas de corte, 20% metalúrgica, 7% en magnéticos entre otros). Teniendo esto en cuenta empezó a recolectar los productos de los cuales se pudiese obtener la mayor cantidad de tierras raras. Entre los productos que pueden representar una buena fuente están los celulares por su demanda (de 1997 a 2011 las ventas incrementaron de 150 millones de piezas a 1800 millones de piezas). Además también comprobaron que los depósitos pueden ser fuentes más ricas que la minería primaria; durante el año 2010 de una mina se puede extraer aproximadamente 5g/ton, mientras que en la minería urbana en computadores personales esta cifra gira alrededor de 200-250 g/ton y para los celulares 300-350 g/ton (Rodrigues, R., 2011).

### **3.1.3 ERAMET**

Ésta es una empresa minera y metalúrgica francesa que opera en más de veinte países en cinco continentes. Está dividida en tres divisiones de negocios, una se dedica a explorar minas de níquel, otra de manganeso y la última de otros metales, esto debido a que su estrategia de crecimiento se basa en diversificar su portafolio, comercializando cobalto, titanio y productos basados en tungsteno, mientras desarrolla o estudia nuevas actividades centradas en el litio, zirconio, niobio, escandio, tantalio y tierras raras (ERAMET, 2015c).

Es por esto que el grupo también participa en el reciclaje a partir de desechos industriales con altos contenidos de metales, extrayendo y vendiendo dichos materiales (ERAMET, 2015f). Esto se hace en la división del manganeso, en compañías que se sitúan en los Estados Unidos, Francia y Bélgica.

Uno de los cuatro grandes proyectos que esta empresa tiene en el momento es el de la operación de un depósito polimetálico, aquí busca maximizar la eficiencia productiva de un depósito en Gabon que tiene reservas de niobium, tantalum, tierras raras y uranium. Uno de los retos a los que se enfrentan en este proyecto es el desarrollo de un nuevo proceso de recuperación adecuado para el tratamiento hidrometalúrgico de pyrochlores, para esto se cuenta con el apoyo del grupo y centro de investigación de ERAMET, al igual que con laboratorios internacionales investigativos (ERAMET, 2015b).

### **3.1.4 Japan Metals & Chemicals Co., Ltd.**

Esta empresa fue fundada el 25 de agosto 1917 bajo el nombre de Hokkai Denka Kogyo Co. Ltd en Fushiki-cho, ahora conocida como la ciudad de Takaoka. Hoy en día se dedica principalmente a las ferroaleaciones, hidruros de metales y metales no ferrosos, productos férricos y cerámicos, y al servicio de consultoría de energía geotérmica y generación de energía eléctrica (Japan Metals & Chemicals Co., Ltd., 2015). Así mismo, en el 2012 iniciaron actividades de reciclaje de metales de tierras raras de las baterías de Níquel Metal Hidruro (Ni-MH) (Japan Metals & Chemicals Co., Ltd., 2015b).

Los productos que maneja esta compañía se distribuyen en tres grandes divisiones: la de ferroaleaciones; la de materiales funcionales, en la que se encuentra el grupo de cerámicos, el grupo de ferrita, el grupo de metales, el negocio de desarrollo de

sistemas y el departamento de materiales electrónicos; y la de energía, que se compone por el departamento de energía geotérmica y el departamento de energía eléctrica (Japan Metals & Chemicals Co., Ltd., 2015c).

## **3.2 Marco Teórico**

Para la correcta apropiación de este proyecto es fundamental tener claridad de algunos conceptos que son base teórica del mismo, los cuales se explican a continuación.

### **3.2.1 Logística Reversiva**

Logística reversiva se puede dividir en dos: devoluciones (producto no conforme) y “reciclaje”. La definición que más importante para este proyecto es la segunda, por esta razón sólo se ampliará en ella. Son todos aquellos procesos y actividades necesarias para gestionar el retorno de todos aquellos productos, materiales e información destinados al reprocesamiento, reutilización, reciclaje o adecuada disposición final con el fin de recuperar, total o parcialmente, su valor de una manera ecológica sostenida. Lo anterior se busca implementarlo y realizarlo de la manera más eficiente posible, disminuyendo costos y maximizando los beneficios. (Morales, n.d) (Monroy & Ahumada, 2006)

### **3.2.2 Minería Inversa**

Minería Inversa es la rama de la logística reversiva encargada de la recuperación de materiales a partir de productos que han agotado su vida útil o han sido descartados, así mismo se pueden minar dichos materiales de los desechos que surgen durante los procesos productivos y de productos rechazados por cuestiones de calidad, ya sea por la empresa productora o el cliente. Dentro de los principales objetivos de esta rama se encuentran los materiales críticos (Stricker, N., 2013).

### **3.2.3 Materiales Críticos**

Son materiales que tienen una alta demanda, limitados o ningún sustituto, con riesgo de interrupción en el suministro. Estos materiales han pasado a ser fundamentales para la sociedad debido a sus múltiples usos gracias a sus propiedades, entre éstas se encuentran las magnéticas, catalizadoras y luminiscentes. Estos se pueden encontrar en una gran variedad de productos, lo cual incluye desde chips de computadoras hasta

turbinas eólicas, pasando por tratamientos para cáncer y rayos X (European Commission, 2014).

### **3.2.4 Tierras Raras**

Son un grupo de elementos químicos que pertenecen al grupo de materiales críticos. Son llamados así ya que la mayoría de estos fueron descubiertos durante los siglos 18 y 19, además, a causa de su reactividad es difícil encontrarlos como metales puros. Adicionalmente, no fue encontrado un método eficiente de separación hasta el siglo 20 (Castor, S., & Hedrick, J., 2009).

Otra definición que ayuda a complementar el concepto es que son una serie de elementos químicos encontrados en la corteza terrestre, vitales para la tecnología moderna, incluyendo energías limpias, transporte, salud, computadoras, celulares, entre otras. Todo esto gracias a sus peculiares propiedades magnéticas, radioactivas, luminiscentes, electro químicas, catalizadoras, conductivas o eléctricas, mecánicas, ópticas y térmicas. Ayudan a producir tecnologías con menor peso, menos emisiones o les brindan un desempeño más eficiente y durable por nombrar algunas cualidades (Rare Earth Technology Alliance, 2015).

### **3.2.5 Técnicas de Pronósticos**

Pronosticar es la ciencia de predecir los eventos futuros a través de métodos y herramientas que pueden comprender desde el empleo de datos y modelos matemáticos hasta predicciones subjetivas o intuitivas. Es relevante tener en cuenta que no existe algún método mejor que otro, todo depende del objetivo, los elementos con los que se cuentan y el horizonte de tiempo (Heizer, J. H., & Render, B., 2004).

Para hacer un pronóstico se necesita representar gráficamente los datos, se debe buscar la distribución que tenga un mejor ajuste a los mismos, luego se debe realizar una proyección con la ecuación matemática de dicha distribución, pasando a verificar la pertinencia del modelo que se haya seleccionado, para así finalmente hacerle los ajustes pertinentes.

Los métodos de pronósticos pueden ser subjetivos (cualitativos) u objetivos (cuantitativos). Entre estos últimos se encuentran varios métodos que dependen del patrón de los datos a proyectar, si estos son perpetuos o uniformes se puede usar el promedio móvil simple o el suavizamiento exponencial simple, si tienen una tendencia creciente o decreciente se recomienda el suavizamiento exponencial doble o modelo de Holdt, para tendencias estables o datos asociados a un cambio el promedio móvil

ponderado, si se encuentran altamente correlacionados es mejor la regresión lineal, para datos estacionales o periódicos el pronóstico estacional, promedios móviles centrados (también aplica si hay tendencias a crecer o decrecer) y el método Winters. Cabe resaltar que los métodos mencionados anteriormente se usan típicamente para pronosticar la demanda (Gironza, C., 2014).

Debido a que el uso de aparatos tecnológicos como computadores, celulares, baterías, bombillos, entre otros va a ir en aumento con el transcurso de los años, se va a utilizar el método de proyección de tendencias.

### **3.2.6 Vida Útil**

La vida útil de un producto se relaciona con la duración teórica del producto, es el tiempo estimado que tiene un objeto donde la función con la cual fue creado se cumple correctamente, es decir, el tiempo esperado de vida para el cual el producto fue diseñado, un periodo aceptable de uso del objeto. Generalmente la vida útil de un producto se predice bajo ciertas condiciones, éstas pueden ser genéricas o depender de las aplicaciones específicas del mismo. Este valor se determina considerando el diseño y la implementación de los componentes, al igual que con los tiempos límites obtenidos con la ayuda de tests de resistencia (Searles, C., & Schiemann, M., 2014).

### **3.2.7 Vida Estética**

La vida estética se relaciona con la duración real o práctica del producto, es el tiempo durante el cual los límites de confiabilidad de las diferentes características de un producto se van a cumplir. La vida estética se da bajo una carga determinada y condiciones específicas de mantenimiento, es decir, el tiempo real de servicio del producto bajo las condiciones instaladas. Este puede ser afectado por diferentes aspectos los cuales varían de acuerdo a las características del producto, entre ellas se puede encontrar la temperatura, defectos de manufactura, factores medioambientales como temperatura o humedad, entre otras. Estos valores se dan con la experiencia de campo bajo condiciones óptimas (Searles, C., & Schiemann, M., 2014).

### **3.2.8 Obsolescencia**

Obsolescencia se define como una medida de la pérdida de valor de un activo resultante de la reducción de la utilidad del mismo relativo a las expectativas del mercado (Barreca, S., 2000). La obsolescencia puede ser de dos formas: tecnológica o funcional. Actualmente, los acelerados cambios en el desarrollo de productos dan origen a la obsolescencia tecnológica. La obsolescencia programada –una forma de

obsolescencia funcional- es el fin programado de la vida útil de un producto o servicio, es decir que desde el diseño del producto se establece una caducidad para el mismo, en ese punto se pueden presentar daños en la estructura o los materiales, ocasionando una disminución en la función, la utilidad y el valor del producto (Roland, S., 2011) (Arambulo, O., 2013).

Es importante mencionar que el reciclaje de los productos se realiza cuando finaliza cualquiera de los últimos tres casos mencionados, ya sea la vida útil, la vida estética, o que el producto se considere obsoleto.

### **3.2.9 Residuos electrónicos en Colombia**

En Colombia existe la Ley No. 1672 del 19 de julio de 2003, que establece los lineamientos para la adopción de una política pública de gestión integral de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) generados en el territorio nacional. Lo anterior con las directrices del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

El alcance de esta ley está dentro del territorio nacional, a las personas naturales o jurídicas que importes, produzcan, comercialicen, consumen aparatos eléctricos y electrónicos y gestionen sus respectivos residuos.

## 4 CAPÍTULO IV. Metodología

### 4.1 Gestión del Proyecto de Investigación

A continuación se encuentra un diagrama de flujo en el que se describen las diversas actividades a realizar para el desarrollo de cada uno de los objetivos específicos del proyecto. Cabe aclarar que la sigla TR es una abreviatura de tierra rara.

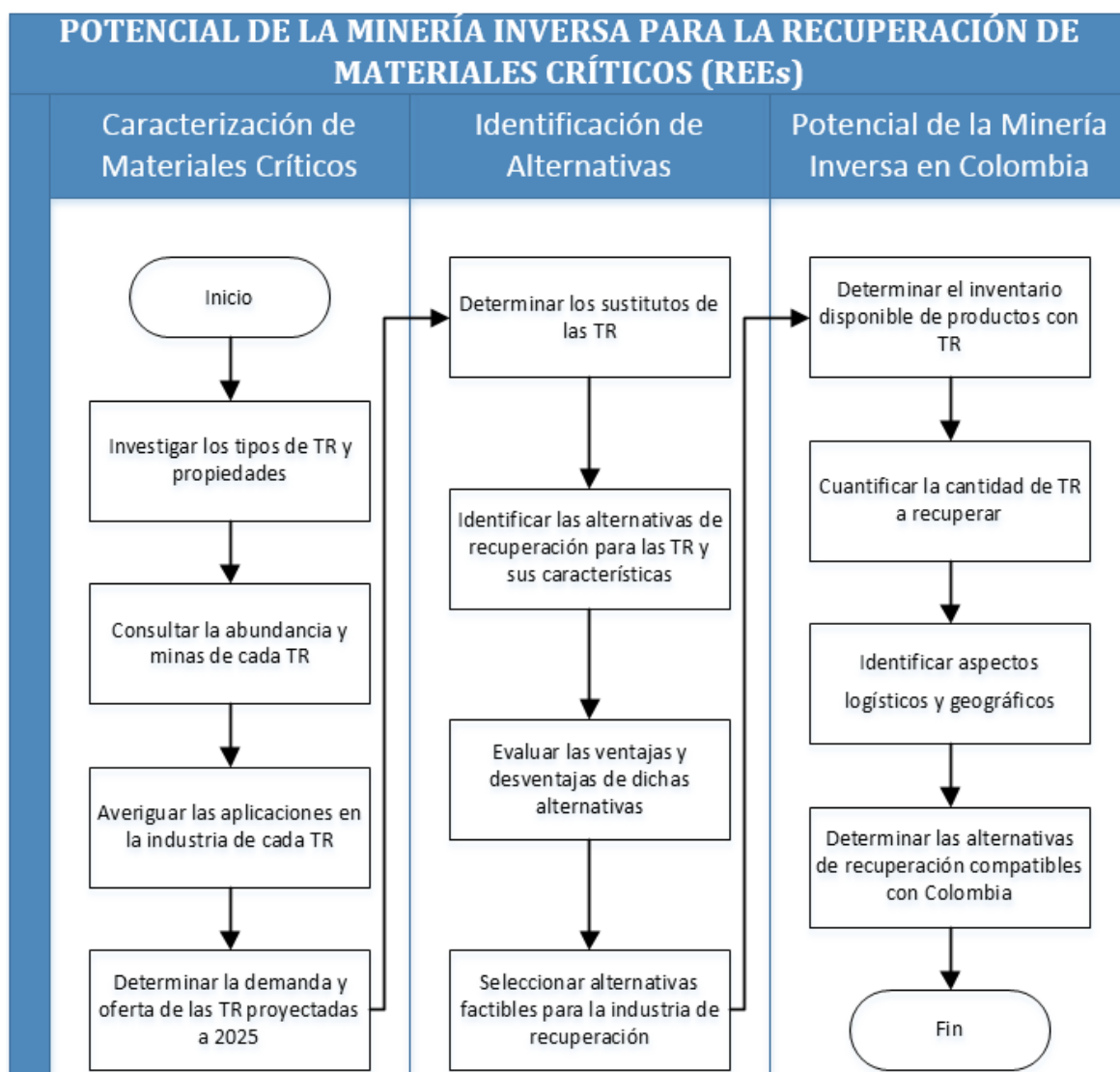


Figura 3. Metodología de investigación

De igual manera se realizó un cronograma en el que se determinan las fechas en las que se debería ir concluyendo cada una de estas actividades, el cual se presenta a continuación:

<b>1 Entregas PDGI</b>	<b>67 días?</b>	<b>vie 6/02/15</b>	<b>mar 12/05/15</b>
1.1 Justificación, análisis e identificación del problema	2.8 sem.	vie 6/02/15	mié 25/02/15
1.2 Marco Teórico	17 días?	mar 3/03/15	mié 25/03/15
1.3 Metodología	19 días?	mar 7/04/15	vie 1/05/15
1.4 Sustentación PDG I	0 días	mar 12/05/15	mar 12/05/15
<b>2 Caracterización de MC</b>	<b>21 días</b>	<b>mié 18/03/15</b>	<b>mié 15/04/15</b>
2.1 Identificar materiales, propiedades, localización	10 días	mié 18/03/15	mar 31/03/15
2.2 Aplicación en industria	6 días	mié 1/04/15	mié 8/04/15
2.3 Demanda proyectada	5 días	jue 9/04/15	mié 15/04/15
2.4 Oferta MDO	5 días	jue 9/04/15	mié 15/04/15
2.5 Terminación objetivo específico 1	0 días	mié 15/04/15	mié 15/04/15
<b>3 Identificar Alternativas para MC</b>	<b>48.7 días</b>	<b>lun 1/06/15</b>	<b>mié 5/08/15</b>
3.1 Identificar sustitutos	2 días	lun 1/06/15	mar 2/06/15
3.2 Alternativas de recuperación	2 sem.	lun 1/06/15	vie 12/06/15
3.3 Análisis y Evaluación de alternativas identificadas	7 sem.	lun 15/06/15	sáb 1/08/15
3.4 Selección de alternativas factibles para la industria de recuperación	2 sem.	jue 23/07/15	mié 5/08/15
3.5 Terminación objetivo específico 2	0 días	mié 5/08/15	mié 5/08/15
<b>4 Evaluar potencial de MI en Colombia</b>	<b>100.7 días</b>	<b>jue 9/04/15</b>	<b>mié 19/08/15</b>
4.1 Inventario disponible por consumo/oferta	3 sem.	jue 9/04/15	mié 29/04/15
4.2 Cuantificar potencial de recuperación	5 sem.	jue 30/04/15	mié 3/06/15
4.3 Aspectos logísticos y geográficos (HOT POINTS)	2 sem.	jue 4/06/15	mié 17/06/15
4.4 Match entre alternativas y Colombia	3 sem.	mié 5/08/15	mié 19/08/15
4.5 Terminación objetivo específico 3	0 días	mié 19/08/15	mié 19/08/15
<b>5 Entrega documento final</b>	<b>15 días</b>	<b>jue 20/08/15</b>	<b>jue 3/09/15</b>
5.1 Escritura y revisión del documento final	1.9 sem.	jue 20/08/15	vie 28/08/15
5.2 Revisión del documento por parte de los evaluadores	0 días	vie 28/08/15	vie 28/08/15
5.3 Sustentación final	0 días	jue 3/09/15	jue 3/09/15

Figura 4. Cronograma de la investigación

En el cronograma anterior se tienen varias actividades críticas, la primera de ellas consiste en encontrar el inventario disponible por oferta y consumo en Colombia, al igual que cuantificar el potencial de recuperación, ya que para esto es necesario el uso de información sobre las importaciones de diversos productos a Colombia.

Otras actividades críticas actuales son hallar, analizar y evaluar las alternativas de recuperación, y finalmente determinar cuáles de las últimas son compatibles con el contexto colombiano.



## **4.2 Metodologías de Análisis**

Para la metodología de este proyecto, por ser investigativo, se va a hacer una revisión bibliográfica profunda, al igual que un análisis comparativo entre las diferentes alternativas de recuperación de tierras raras.

El tema de este proyecto de grado es un tema poco o nada investigado en Colombia, pero sí en Japón y Europa que son lugares en los que el contexto económico, político y social es muy diferente. Por esta razón el primer paso es encontrar los suficientes artículos, libros, revistas entre otras fuentes de información, y a partir de este punto se confrontarán las diferentes teorías, metodologías y proyectos realizados en estos países para encontrar la que mejor se ajuste a la realidad y objetivos de Colombia. Por medio de tablas en Excel se va a hacer una comparación de diferentes fuentes; así mismo se puede filtrar, clasificar y organizar la información. Este proceso será fundamental para los dos primeros objetivos (caracterizar los materiales críticos, e identificar las alternativas que puedan ser usadas como sustitutos de los mismos y diversas técnicas de recuperación de estos materiales).

Para el tercer objetivo (evaluar el potencial de la minería inversa en Colombia) se recolectarán datos de las importaciones de Colombia de los productos que contengan los materiales inherentes a esta investigación (Colombia no produce ninguno de estos elementos, por esta razón sólo se tiene en cuenta la importación). De aquí se puede extraer información tal como la cantidad y tipo de productos que entran al país, al igual los departamentos que mayor demanda tienen de los mismos, esto con el fin de establecer puntos estratégicos donde se podría realizar la recolección y/o el reciclaje, entre otros datos que sustentarán la evaluación del tercer objetivo. A partir de los datos recolectados se hará un pronóstico hasta el año 2020 por medio de la proyección de tendencias en Microsoft Excel.

## 6 TÍTULO V. Resultados

### 6.1 Análisis de resultados

#### 6.1.1 Caracterización de los diferentes materiales críticos existentes

##### 6.1.1.1 *Materiales y propiedades*

Actualmente se reconoce que los materiales críticos son fundamentales para la economía y tienen un riesgo de abastecimiento, de igual manera son muy importantes para mantener y mejorar la calidad de vida de las personas. A la fecha se conocen 54 materiales que pueden ser considerados como críticos, los cuales serían antimonio, berilio, boratos, cromo, cobalto, carbón de coque, espato flúor, galio, germanio, indio, magnesita, magnesio, grafito natural, niobio, el grupo del platino (rutenio, rodio, paladio, osmio, iridio y platino), roca fosfórica, tierras raras (pesadas y livianas), silicio metálico y tungsteno. Este proyecto sólo se concentrará en el grupo de las tierras raras, las cuales son 17 elementos químicos de los cuales 15 pertenecen al grupo de los lantánidos (lanthanum, cerium, praseodymium, neodymium, promethium, samarium, europium, gadolinium, terbium, dysprosium, holmium, erbium, thulium, ytterbium y lutetium) y dos metales de transición (scandium e yttrium) (European Commission, 2014).

Las tierras raras se pueden encontrar en la tierra, en los océanos y en las rocas de la corteza. Los océanos tienen la menor cantidad de materiales, mientras que las rocas de la corteza tienen una abundancia significativamente mayor. Los valores para cada material son presentados en la Figura 5. Cabe aclarar que los casos en los que la abundancia se muestra como cero es porque no se tienen datos de la misma, no porque no se pueda encontrar en ése lugar.

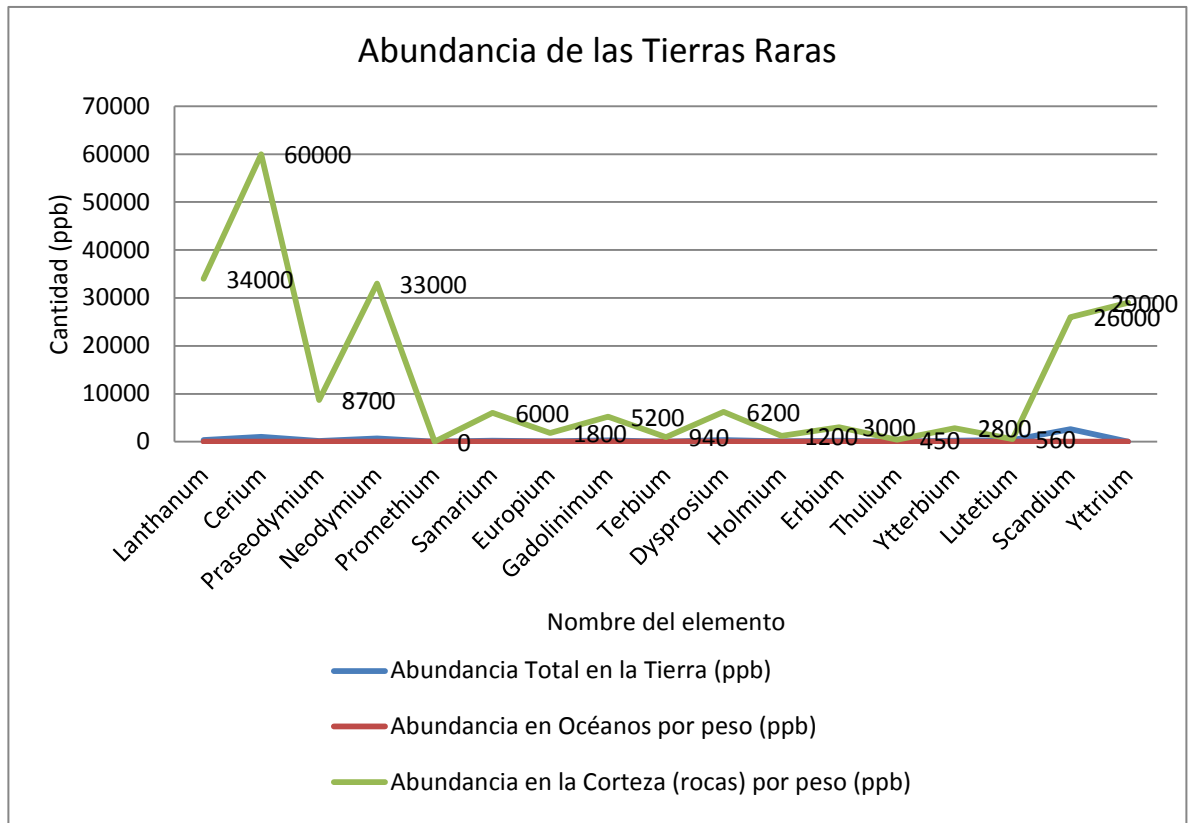


Figura 5. Abundancia de las tierras raras en la tierra, los océanos y las rocas de la corteza (American Elements, 2015)

Las tierras raras tienen múltiples características o propiedades con un desempeño superior que los demás elementos con comportamientos parecidos, razón por la cual son la base de su importancia en la industria y otras áreas, como por ejemplo la de la defensa, de gran interés para los Estados Unidos y Japón (European Commission, 2014). Entre las características se encuentran las químicas, metalúrgicas, electro-ópticas, magnéticas, catalizadoras, conductivas/eléctricas, mecánicas, térmicas y radioactivas (American Elements, 2015).

En las propiedades *químicas* se destaca su importancia en el proceso de pulido, especialmente en el vidrio; esto se logra al remover materiales por un proceso mecánico de abrasión, es este aspecto se destacan los óxidos de tierras raras, especialmente el del cerium. Para el pulido igualmente es beneficioso que las tierras raras son consideradas fisiológicamente inertes (Jha, A. R., 2014).

En la parte *metalúrgica* se destaca el desarrollo de compuestos a base de aleaciones de tierras raras que se usan para productos especiales con capacidades de desempeño especiales, aquí las tierras raras eliminan el oxígeno, azufre y otros elementos perjudiciales, al igual que actúa como el sustancia límite tensoactiva. En muchos casos estos beneficios se logran con un costo y complejidad mínimo (Jha, A. R., 2014).

Las propiedades *electro-ópticas* son de vital importancia en sus aplicaciones y en este campo se dieron los primeros usos de las tierras raras. Por ejemplo con el europium y el yttrium se hicieron los fósforos rojos para la televisión a color. Con estos materiales se logran líneas de absorción y/o emisión agudas y estrechas en el rango visible del espectro infrarrojo, esto gracias a la estructura atómica de la superficie, esto último tiene múltiples utilidades, como por ejemplo la coloración de vidrio usando neodymium y praseodymium. Así mismo los componentes en el vidrio de óxidos de tierras raras o basados en óxido dan un gran índice de refracción con una baja dispersión. Por otro lado el óxido de gadolinium es importante en el campo de la intensificación de los rayos x, ya que con dichos rayos los óxidos de las tierras raras se excitan y emiten un rango visible del espectro, logrando que la película de rayos x se exponga con una radiación mínima (Jha, A. R., 2014).

Las propiedades *magnéticas* se dan gracias a las estructuras atómicas de las tierras raras, sus aplicaciones son de especial interés cuando se tengan requerimientos de peso mínimo y tamaño para el diseño; de igual manera son importantes en la producción de materiales magnéticos duros. En el desarrollo de imanes permanentes para motores eléctricos y generadores los materiales ideales serían samarium, neodymium y praseodymium (Jha, A. R., 2014).

Las propiedades *catalizadoras* son las encargadas de acelerar el proceso de reacción de un proceso químico o hacer que este llegue al estado de equilibrio rápidamente. Esto es necesario para algunas reacciones en las que el tiempo afecta el proceso y no se puede introducir calor ni otras maneras de hacerlo ya que pueden tener efectos no deseados. Por ejemplo el lanthanum es utilizado como catalizador en el proceso de petróleo como combustible y se está investigando en la producción de gas a partir del metano (American Elements, 2015).

En cuanto a las propiedades *conductivas/eléctricas* se pueden definir como la capacidad que posee un material para dejar fluir con mayor facilidad la electricidad eléctrica dentro de su estructura. Es una propiedad característica de los metales (las tierras raras pertenecen al grupo de metales de transición), ya que sus enlaces atómicos son débiles. Un buen ejemplo es el samarium, en estado sólido, dependiendo de la temperatura y presión puede tener un diferente comportamiento, puede ser

conductor o generar resistencia; utilizado para sensores de presión y dispositivos de memoria principalmente (American Elements, 2015).

Las propiedades *mecánicas* son amplias, dentro de estas se encuentran la elasticidad o plasticidad del material, resistencia a la torsión, dureza o fragilidad y tenacidad entre otras.

En cuanto a las propiedades *térmicas*, se definen como la propiedad que tienen un material de absorber el calor, y el material puede difundir este calor (conductividad térmica) o se dilata. Uno de los materiales que tienen esta propiedad está el praseodimio utilizado como dispositivos refrigerantes que deben alcanzar temperaturas muy bajas (American Elements, 2015).

Las propiedades *radioactivas* consisten en que el núcleo de los elementos generan radiaciones, estas pueden ser electromagnéticas, rayos x, gamma por mencionar algunos que pueden atravesar cuerpos. Dentro del grupo de tierras raras son diversos los elementos que tienen esta propiedad, entre estos están el europio, disprosio, y erbio que son utilizados en el campo de la medicina para rayos X, resonancias magnéticas o tratamientos para cáncer (American Elements, 2015).

Cabe resaltar que las propiedades de cada material varían según la aleación, presentación, temperatura o presión en la que se empleen. Así mismo el elemento con mayores características no es necesariamente el más utilizado en la industria.

A continuación se presenta una tabla donde se resumen las propiedades mencionadas anteriormente para cada material.

Tabla 1. Propiedades de las Tierras Raras (American Elements, 2015) (Schüler et al, 2011)

Propiedades que fomentan el uso de las Tierras Raras									
REE	Catalizadoras	Conductivas / Eléctricas	Mecánicas	Ópticas	Térmicas	Químicas	Radiactivas	Magnéticas	Total
La	x	x	x			x			4
Ce	x	x	x	x		x			5
Pr	x	x		x	x	x			5
Nd	x			x		x		x	4
Pm					x		x		2
Sm	x	x			x		x	x	5
Eu		x		x			x		3
Gd		x	x	x	x		x		5
Tb		x	x	x				x	4
Dy		x		x			x	x	4
Ho				x				x	2
Er				x	x		x		3
Tm		x			x		x	x	4
Yb		x	x	x			x		4
Lu	x			x			x	x	4
Sc		x		x	x				3
Y	x			x	x	x	x	x	6
<b>Total</b>	<b>7</b>	<b>11</b>	<b>5</b>	<b>13</b>	<b>8</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>8</b>	

### 6.1.1.2 Aplicaciones en la industria

Las tierras raras tienen múltiples aplicaciones en la industria que dependen del campo de interés. Los usos principales o más comunes de las tierras raras individualmente son los siguientes: para el lanthanum las aleaciones metálicas o baterías y los motores para vehículos híbridos; el cerium para la catálisis y aleaciones de metales de refinamiento de petróleo; el praseodymium para imanes permanentes (presentes en computadores, celulares, turbinas de viento, entre otros); el neodymium en catálisis, refinamiento de petróleo, discos duros de computadores, audífonos, motores, celulares y otros dispositivos móviles; el samarium en imanes permanentes; el europium para pantallas de computadores y el color rojo en pantallas de televisores; el terbium en bombillos e imanes permanentes; el dysprosium en imanes permanentes y motores de vehículos híbridos; el terbium en bombillos, láser y amplificadores de fibra óptica; el yttrium en bombillos fluorescentes y el color rojo en pantallas; el holmium para láser y coloración de vidrio; el thulium en rayos x médicos y láser; el lutetium para la catálisis en el refinamiento del petróleo y láser infrarrojo; el

ytterbium en láser y aleaciones de acero; el scandium en aleaciones para componentes aeroespaciales y misiles espaciales; el promethium en la parte radioactiva; y finalmente el gadolinium en imanes permanentes (Jha, A. R., 2014).

A continuación se resume en dos tablas las diversas aplicaciones de las tierras raras que permiten la recuperación de materiales críticos. La primera muestra aquellas aplicaciones en las que la recuperación se hace a partir de productos en proceso.

Tabla 2. Posibles fuentes presentes y futuras para el reciclaje de REEs de productos en proceso (Binnemans et al., 2013)

REE	Virutas magnéticas e imanes rechazados	Residuos durante la producción o reciclaje de metales	Residuos industriales (fosfoyeso, barro rojo, entre otros)	Total
La		x	x	2
Ce		x	x	2
Pr	x	x	x	3
Nd	x	x	x	3
Pm		x	x	2
Sm		x	x	2
Eu		x	x	2
Gd		x	x	2
Tb	x	x	x	3
Dy	x	x	x	3
Ho		x	x	2
Er		x	x	2
Tm		x	x	2
Yb		x	x	2
Lu		x	x	2
Sc		x	x	2
Y		x	x	2
<b>Total</b>	<b>4</b>	<b>17</b>	<b>17</b>	

En la tabla anterior se puede observar que de los residuos presentes durante la producción o reciclaje de metales al igual que de los residuos industriales se puede hacer una recuperación de todas las tierras raras. Por otro lado en los tres casos de productos en proceso se encuentran el Prasedonium, Neodymium, Terbium y Dysprosium.

La segunda tabla muestra las principales aplicaciones de las tierras raras, por lo que permite determinar aquellos materiales que se pueden recuperar una vez el producto

haya terminado su vida útil, se retire del mercado por cuestiones de calidad o simplemente lo hayan desechado.

Tabla 3. Posibles fuentes presentes y futuras para el reciclaje de REEs de productos terminados (Binnemans et al., 2013) (Schüler et al, 2011)

Posibles fuentes presentes y futuras para el reciclaje de REEs												
REE	Bombillos fluorescentes	LEDs	LCD Backlights	Pantallas plasma	Laptops	Celulares	Tubos de rayos catódicos (CRTs)	Imanes permanentes NdFeB	Turbinas de viento	Vehículos híbridos/eléctricos	Baterías NiMH	Total
La	x		x	x							x	4
Ce	x	x	x	x							x	5
Pr					x	x		x			x	4
Nd					x	x		x	x	x	x	6
Pm												0
Sm												0
Eu	x		x	x			x					4
Gd	x		x	x								3
Tb	x		x	x	x	x		x	x			7
Dy					x	x		x	x	x		5
Ho												0
Er												0
Tm												0
Yb												0
Lu												0
Sc												0
Y	x	x	x	x			x					5
<b>Total</b>	<b>6</b>	<b>2</b>	<b>6</b>	<b>6</b>	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	

En la tabla anterior se puede observar que de todos los productos que tienen tierras raras entre sus componentes, los que poseen una mayor diversidad de los mismos son los bombillos fluorescentes, las pantallas plasma y las LCD Backlights. Por otro lado, las tierras raras que se encuentran en una mayor cantidad de productos son principalmente el Terbium, seguido del Neodymium, el Cerium, Dysprosium e Yttrium.

### 6.1.1.3 Demanda y oferta del mercado

La adopción de nuevas tecnologías puede ocasionar cambios bruscos en la demanda de los materiales que se usan para su producción (Alonso et al., 2012). Este es el caso de las tierras raras, que no sólo se encuentran en muchos aparatos tecnológicos (celulares, carros, bombillos fluorescentes, etc.) usados en la cotidianidad, sino que también son fundamentales para diversas tecnologías verdes o limpias (turbinas eólicas, motores eléctricos, entre otros), las cuales son muy populares hoy en día a causa del cambio climático, entre ellas se pueden observar turbinas de viento o



vehículos híbridos/eléctricos. Así mismo, estos cambios en la demanda pueden conducir a una inestabilidad del mercado y a picos en los precios.

Por otro lado hay varios riesgos a la hora de satisfacer la demanda de estos materiales, inicialmente se tiene que China controla el 98% del abastecimiento de los mismos, el 2% restante se encuentra en Rusia, Estados Unidos, Brasil, India, Vietnam, Malasia y Australia; por otro lado la explotación de estos materiales es co-minada, esto quiere decir que no se explota cada tierra rara de manera individual ya que generalmente se encuentran juntas en los depósitos, ocasionando que una extracción individual sea ineficiente económicamente. Finalmente, existen bastantes problemáticas a nivel mundial debido a las condiciones ambientales y sociales bajo las cuales se minan estos materiales, lo cual incrementa el riesgo de abastecimiento (Alonso et al., 2012).

Existen 5 escenarios de la evolución de la demanda de las tierras raras. Estos sólo tienen en cuenta 10 de las 17 tierras raras debido a que los datos disponibles en este aspecto son principalmente de los siguientes materiales: La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, y Y (Alonso et al., 2012).

El escenario A consiste en una evolución de demanda agregada, donde se hace una proyección del crecimiento en el que todos los mercados y producción de las tierras raras tienen un crecimiento de demanda uniforme a tasas históricas. El escenario B es una evolución de demanda desagregada, en el que se desarrollan las demandas de cada industria de manera individual y el consumo del mercado tiene un crecimiento de demanda a tasas históricas. El escenario C es en una demanda revolucionaria implícita en el que las tasas de crecimiento proyectadas a futuro se basan en las expectativas reportadas del mercado predichas por expertos en la industria. El escenario D es una demanda agresiva revolucionaria, donde hay mucha electrificación automotriz, todas las turbinas de viento utilizan imanes permanentes y los otros mercados de tierras raras crecen a tasas históricas. Finalmente el escenario E es una demanda revolucionaria moderada, en el que las turbinas de viento no usan imanes permanentes y las demandas de los mercados de otras tierras raras crecen a tasas históricas (Alonso et al., 2012).

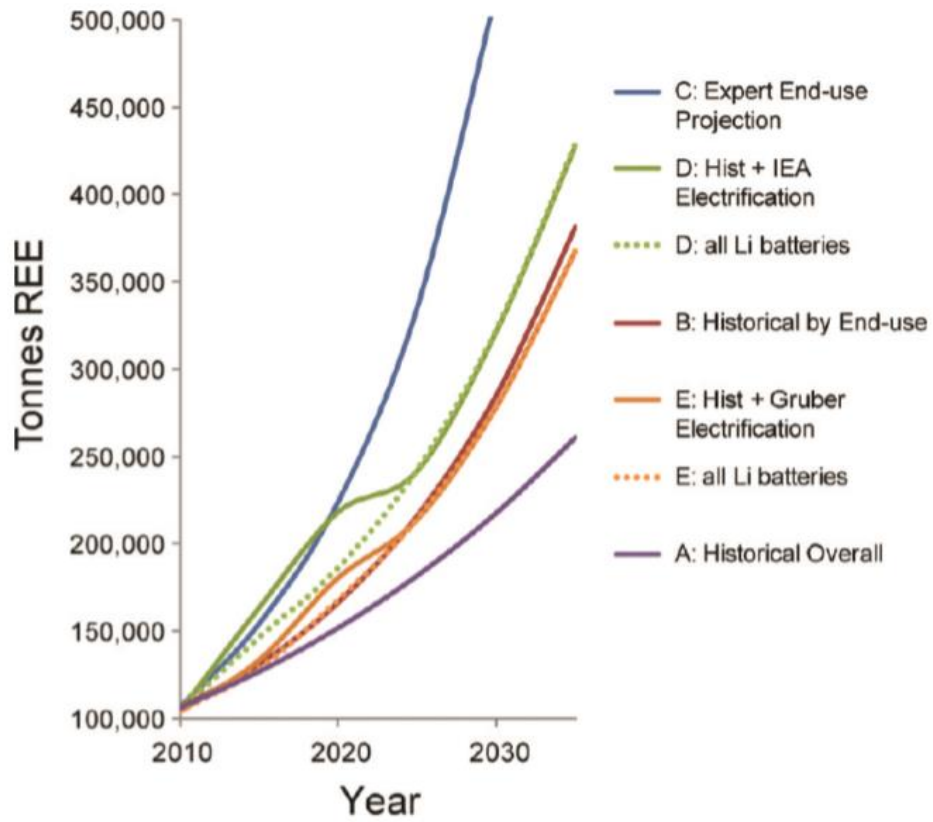


Figura 6. Comparación de los escenarios de las proyecciones de la demanda para tierras raras (Alonso et al., 2012)

En el escenario A todas las industrias van a mantener la misma parte del mercado y crecerán a una tasa de 3,7%/año. En el escenario B la de las tierras raras crecerán a una tasa conjunta de 5,3%/año entre el 2010 y el 2035, con esto la demanda se duplicaría entre el 2010 y el 2025. En este modelo el mercado de imanes y compuestos de pulido tendrá un crecimiento mayor, mientras que disminuiría el de la catálisis para automóviles y petróleo, al igual que el de aditivos de vidrio; sin embargo los cambios no son muy significativos, hay pequeños aumentos en la demanda de Nd, Pr, y D, con disminuciones bajas en Y, Sm, y Gd. El escenario C muestra que el mercado de los imanes podría crecer hasta representar un 50% del mercado de las tierras raras, por lo que la demanda de Ce y Y bajaría, mientras que la de Dy, Nd y Pr aumentaría en los próximos 25 años; así mismo las tasas de crecimiento pronosticadas serían generalmente más altas que las históricas, con un crecimiento anual promedio de 8,6% en los próximos 25 años. El escenario D muestra que el uso de tierras raras está proyectado a un crecimiento de hasta 25% de la demanda de las mismas en un corto plazo, el crecimiento se da por el uso de éstas en las baterías de

níquel metal hidruro (NiMH), que luego se espera que se reduzca al ser reemplazadas por las de ion litio; la tasa de crecimiento a largo plazo sería de 5,9%/año en los próximos 25 años. Sin embargo en el escenario E la demanda revolucionaria sólo alcanzaría una pequeña parte de la demanda total de tierras raras, la cual llega al 13% antes de que las baterías NiMH sean desplazadas. Con todo lo anterior se puede observar que la demanda proyectada para energía eólica es pequeña comparada con las aplicaciones para los vehículos, por lo que el incremento de la demanda de imanes de estos productos ocasiona más grandes tasas de crecimiento en Nd, Pr y especialmente Dy (Alonso et al., 2012).

Por otro lado el U.S. Geological Survey estima que las reservas totales de óxidos de tierras raras son de aproximadamente 110 millones de toneladas; así mismo hay reportes que afirman que hay grandes depósitos de tierras raras en sedimentos oceánicos profundos, sin embargo la posibilidad de explotarlos no es muy clara. Finalmente es importante mencionar que no se espera que las reservas conocidas de tierras raras sean restrictivas en los próximos 25 años (Alonso et al., 2012).

Como cierre se presentará a continuación una imagen que muestra la producción minera de 2012 y 2013 por país, al igual que las reservas totales de tierras raras en cada uno de ellos.



Figura 7. Producción en minas y reservas de tierras raras por país (ELSEVIER, 2015)

Actualmente se encuentran identificados veinte depósitos de tierras raras en diversos países. A continuación se muestra una imagen de todos ellos, identificando su ubicación y tipo, al igual que si se encuentra operando en el momento o su actividad inició recientemente, por lo que es potencialmente una nueva fuente de estos materiales.

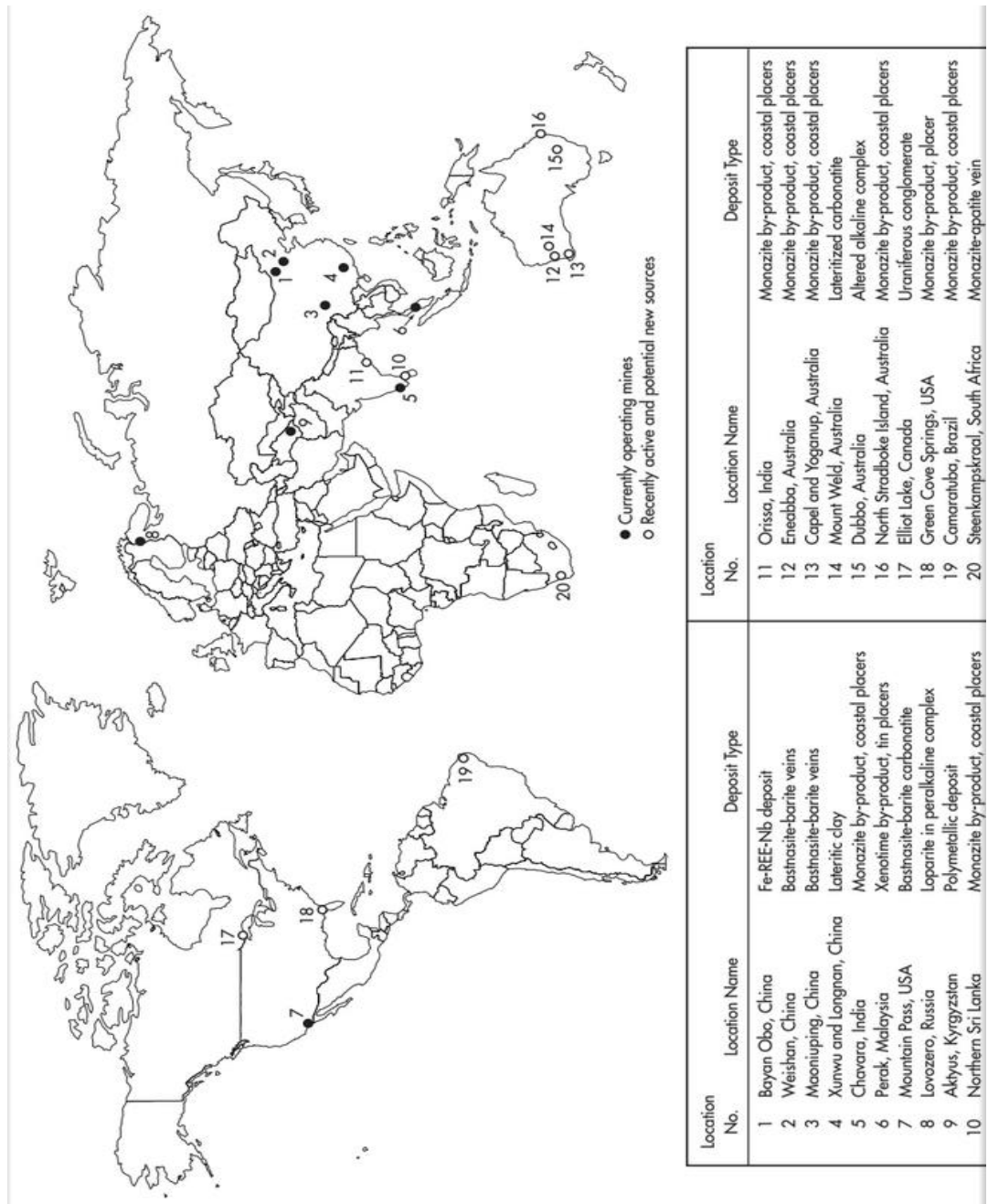


Figura 8. Localización de los depósitos de tierras raras (Castor, S., & Hedrick, J., 2009)

## **6.1.2 Alternativas para disminuir el impacto de la explotación y disposición de materiales críticos**

### ***6.1.2.1 Sustitutos para los materiales críticos***

En un análisis realizado por Schüler et al. (2011) que tiene la intención de evaluar los posibles sustitutos que se pueden usar para las tierras raras muestra que es muy raro realizar una sustitución directa de un componente que sea una tierra rara por otro, y que en su mayoría para hacer dicha sustitución se requeriría hacer un diseño del producto totalmente nuevo. Así mismo, los elementos usados para su fabricación variarían dependiendo de las características y propiedades requeridas para éste, por lo que se debe realizar una investigación individual para verificar la viabilidad de dicha sustitución. Los expertos consideran que el uso de las tierras raras en algunas aplicaciones tecnológicas es clave para asegurar la funcionalidad necesaria, sin embargo también hay casos en los que las tierras raras podrían llegar a no ser usadas en el futuro, un ejemplo de esto es el caso de las baterías de Li-ion, que se están apoderando del mercado para los dispositivos portátiles, desplazando a las de NiMH. Por otro lado, un mayor desarrollo de las unidades de estado sólido puede llegar a reemplazar los discos duros. Así mismo, un estudio del U.S. Department of Energy dice que con las LEDs se podría llegar a eliminar la necesidad del uso de fósforos de lanthanum y terbium, requiriendo así sólo cerium y europium; sin embargo, futuras generaciones de LEDs orgánicas podrían llegar a no tener ningún tipo de tierras raras en sus componentes (Tsamis, A., Coyne, M. 2014).

Aunque con la sustitución se reduzca la demanda de tierras raras en el futuro, se espera que la acumulación de desperdicios tecnológicos que contienen estos elementos continúe en el corto y mediano plazo, debido a la gran cantidad de productos que se encuentran en el mercado, teniendo en cuenta su vida útil y estética (Tsamis, A., Coyne, M. 2014). Para el caso colombiano esta información se encontrará de manera detallada más adelante.

De todas formas, se debe tener en cuenta que centrarse únicamente en remediar el problema actual de las tierras raras, haciendo uso de otros materiales que sirvan como sustitutos, puede conducir a la misma situación pero centrada en otros elementos, ya que no se estaría trabajando de manera sostenible.

### **6.1.2.2 Alternativas de recuperación**

El reciclaje es importante para aumentar la eficiencia del recurso, disminuir el impacto ambiental general y evitar una posible escasez. Éste se puede dividir en dos grupos principales: antes del consumidor y después del consumidor.

La recuperación antes del consumidor es mucho más fácil en comparación con el segundo caso, ya que se tiene una concentración relativamente alta del metal, una fuente de generación conocida y definitiva, al igual que los volúmenes de formación son relativamente altos. En la recuperación después del consumidor, se tiene una complejidad mayor debido a que hay baja concentración del metal, el elemento a reciclar es un componente menor del producto total, obteniendo generalmente una cantidad muy baja de metal, debido a que las aplicaciones para las que se usan son muy nuevas no se dispondrá del producto a reciclar hasta dentro de unos años (Panayotova, M., Panayotov, V., 2012). Debido a esto último, para poder realizar una recuperación exitosa de los materiales se debe tener un sistema e infraestructura para la recolección de los productos, por esto para la recuperación post-consumo se necesita tener en cuenta la recolección de los productos como parte del proceso, ya que se requiere de grandes volúmenes de productos usados o descartados como insumos para la minería inversa. Para que el proceso de recolección sea seguro y exitoso se debe asegurar una infraestructura adecuada e incentivos económicos para asegurar la entrega de residuos, en vez de dárselos a operadores ilegales o informales. Cuando dichos incentivos existen, se facilita la creación de toda la infraestructura por parte de los operadores privados, así se disminuye la posibilidad de que los residuos se pierdan (UNEP, 2013). Los detalles requeridos para la infraestructura varían de acuerdo a las características del producto y sus aplicaciones, un ejemplo de esto es que para el caso de las baterías no es necesario desensamblar el producto antes de iniciar el proceso metalúrgico (a excepción de las baterías de los automóviles híbridos o eléctricos). Para los aparatos electrónicos si es necesaria una separación de los componentes principales, para finalmente transportar sólo las partes de las cuales se pueden recuperar tierras raras (Buchert, M., Schüler D., Bleher D., 2009).

A todo lo anterior es importante añadir que en el caso de las tierras raras los procesos de reciclaje investigados hasta el momento son complejos y extensos, en su mayoría es necesaria mucha energía para poder realizarlos, al igual que se tienen algunas limitaciones físicas y químicas, no siempre se cuenta con la tecnología o infraestructura para el reciclaje, y existe una falta de incentivos de precio para el mismo (Panayotova, M., Panayotov, V., 2012).

Teniendo en cuenta las tecnologías existentes y los niveles de reciclaje actuales, se tiene un estimado del nivel de la recuperación o reciclaje potencial de tierras raras al 2020. Dicho pronóstico se basa en los inventarios estimados de las tierras raras, junto con diferentes escenarios en los que se estudian las tasas de recolección de los componentes y la eficiencia de los procesos de reciclaje que se mencionan posteriormente. El potencial total estimado del reciclaje global al 2020 es de 5,6 a 10,7 miles de toneladas, este resultado es similar al uso anual de tierras raras en Europa (Tsamis, A., Coyne, M. 2014).

En Colombia se observa que Lito se encuentra realizando la recolección de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEEs) en todo el país. Esta empresa se encarga de hacer una gestión integral de excedentes industriales y residuos peligrosos, para lo que cuenta con sedes en Medellín, Bogotá, Cali, Barranquilla y Bucaramanga. Éstas se encargan de recolectar los residuos a través de puntos verdes que pueden encontrarse en empresas, condominios, edificios, entre otros; así mismo hacen desmonte de plantas y equipos obsoletos o en desuso. A partir de ellos realizan un manejo y recuperación de metales estratégicos y excedentes, para luego reintegrarlos como materia prima en los diferentes procesos productivos. Por otro lado también gestionan diversos residuos peligrosos, entre los cuales se encuentran transformadores eléctricos contaminados con policlorobifenilos (PCB), residuos mercuriales, tubos fluorescentes, bombillería y aparatos de mercurio, pilas alcalinas y celulares, y celdas de cadmio. Como en Colombia no se cuenta con la infraestructura para el manejo de dichos residuos, los exportan a países Europeos que se encargan de su aprovechamiento, disposición o eliminación (*Video Institucional LITO S.A., 2012*).

Las alternativas de recuperación y tecnologías existentes son diferentes para los tipos de productos o aplicaciones, a continuación se expondrán los diferentes casos:

### **Imanes permanentes**

Los imanes basados en aleaciones de Neodymium (NdFeB) son los que se usan regularmente en discos duros, aires acondicionados o carros, a los que frecuentemente se les añade dysprosium (la cantidad varía ampliamente con las diferentes aplicaciones) con la intención de aumentar su estabilidad térmica contra la desmagnetización. Un tipo de imán menos usado (menos del 2% del mercado) se basa en aleaciones de samarium-cobalto. Finalmente es importante mencionar que hay diversos tipos de imanes usados en diferentes productos, y aunque se conozca la aplicación específica es complicado saber exactamente el tipo de imán usado (Tsamis,



A., Coyne, M. 2014). Antes de iniciar el proceso de recuperación, se debe identificar el tipo de imán y extraerse (Binnemans et al., 2013).

Los imanes de tierras raras son muy frágiles y se fracturan con facilidad, de hecho se estima que del 20-30% del mismo se desecha durante su fabricación debido a roturas o desperdicio de cortes; todos los residuos producidos durante su fabricación son considerados peligrosos (Panayotova, M., Panayotov, V., 2012).

Los métodos de reciclaje de dichos imanes se pueden resumir en cuatro procesos generales (Schüler et al, 2011):

- 1) Recuperar los desechos de tierras raras en su estado sin oxidar derritiéndolos. Normalmente este proceso tiene un bajo rendimiento para casi todas las fuentes de desperdicio, sin embargo se considera que éste método puede ser el más económico (Kara et al., 2010).
- 2) Recuperar los desechos en su estado de oxidación. El bajo costo de este proceso no está completamente probado, pero se considera que es el procedimiento más apropiado para la manipulación de los materiales.
- 3) Recuperar material de una forma adecuada para elaborar un nuevo imán, para esto se requiere que el desperdicio no esté procesado químicamente y que se conserve como una aleación de metal de alta calidad.
- 4) Extracción directa selectiva de neodymium y dysprosium.

Se debe destacar que normalmente son procesos de bajo rendimiento, contaminantes, con un reprocesamiento costoso (en el caso de los óxidos) y necesidades de ajuste químico. De igual manera se debe tener en cuenta que el transporte de materiales magnéticos es restringido debido a que sus campos electromagnéticos pueden interferir con instrumentos de la fuerza aérea. (Schüler et al, 2011).

Por otro lado, el reciclaje de estos materiales después de pasar por el consumidor tiene un gran potencial en términos de cantidad, sin embargo y como se mencionó anteriormente su complejidad es mayor (Panayotova, M., Panayotov, V., 2012).

Actualmente se pueden encontrar muchos métodos para realizar la recuperación de los materiales de estos productos. Los métodos existentes que se aplican a productos que no han pasado por el consumidor son los de sales fundidas, procesos hidrometalúrgicos, tratamientos con metales líquidos, rotación fundida, método de la escoria de cristal, electroescoria refundida, fresado y re-sinterización. El caso post-consumidor se puede hacer por medio de hidrometalurgia, pirometalurgia (que incluye los métodos de refinación de la electroescoria, extracción de metal líquido,

método de la escoria de cristal y fusión directa), y los métodos de extracción en fase gaseosa (Panayotova, M., Panayotov, V., 2012) (Binnemans et al., 2013).

## **Baterías y pilas**

Las baterías de níquel metal hidruro (NiMH) contienen lanthanum, cerium, praseodymium y neodymium. Hasta hace poco el reciclaje de éstas consistía en la fundición de toda la batería enfocándose en la extracción del níquel, por lo que las tierras raras se perdían en la fundición. Las nuevas investigaciones consisten en métodos metalúrgicos para la recuperación del níquel, el cobalto y las tierras raras (Tsamis, A., Coyne, M. 2014). Una batería NiMH gastada contiene de 36 a 42% de níquel, 3 a 4% de cobalto y de 8 a 10% de tierras raras (Binnemans et al., 2013).

Las tierras raras mencionadas se encuentran en el electrodo negativo de las baterías, la cantidad de éstas varía con el fabricante, por ejemplo Motorola sólo usa del 5 al 15% de la masa total del producto. Sin embargo la chatarra de las células de la aleación del electrodo contiene típicamente 33% de metal de tierras raras (Panayotova, M., Panayotov, V., 2012).

Muchos grupos de investigación han desarrollado métodos hidrometalúrgicos para la recuperación de todos los componentes mencionados en las baterías. Unos ejemplos de estas investigaciones son los siguientes: Lyman y Palmer (1995) hicieron una lixiviación de la chatarra por medio de diversos ácidos (HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, HNO<sub>3</sub>), el mejor resultado se obtuvo con una solución de HCl 4 M, en el que las tierras raras se podían precipitar como fosfatos al añadir ácido fosfórico a la solución. Zhang et al. (2010) desarrolló un proceso hidrometalúrgico en el que los materiales del electrodo son disueltos en una solución H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 2 M o una solución de HCl 3M a 95°C, en las que las tierras raras se recuperaban del solvente por medio de extracción, luego precipitación del ácido y finalmente calcinación para conseguir óxidos de tierras raras. Como éstos, hay muchísimos otros estudios en los que se realiza la disolución de las tierras raras de las baterías NiMH por medio de lixiviación con HCl y H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (Binnemans et al., 2013). Un punto a favor en el proceso de recolección de las baterías, es que a diferencia de todos los demás productos electrónicos, no necesita de un desensamble o separación de sus partes antes de iniciar el proceso metalúrgico o de hacer el transporte (excepto en el caso de las baterías de los automóviles híbridos o eléctricos), lo cual facilita dicho proceso y disminuye sus costos. En cuanto a los sistemas de recolección, es un punto que se espera mejore bastante en el futuro, debido a que se están creando grandes iniciativas para la correcta disposición y

recolección de estos productos. Por ejemplo, en Europa se tienen las cuotas de recolección y reciclaje de la Directiva de Baterías Europea (European Battery Directive). Sin embargo se debe prestar especial atención a la infraestructura en los países en vía de desarrollo, ya que esta es escasa (Buchert, M., Schüler D., Bleher D., 2009).

Para la disposición de pilas en Colombia actualmente se están realizando procesos de cementación, los cuales consisten en enterrar las pilas en rellenos de seguridad (Universidad Nacional de Colombia, A., 2013). Aquí se puede ver la oportunidad de desenterrarlas para proceder a hacer la recuperación de las mismas (de ser posible), sin embargo la cantidad que se pueda obtener es difícil de cuantificar, ya que no se conoce el estado de los residuos, la viabilidad de la recuperación debido a ello, ni la cantidad y tipo de baterías enterradas. Sin embargo, Luz Marina Ocampo Carmona, docente del Departamento de Ingeniería de Materiales de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia ha declarado que considera que al terminar la vida útil de las mismas se puede recuperar zinc, hierro y óxido de manganeso de aquellas pilas alcalinas que no contienen carbono. Por esto, la Universidad Nacional de Colombia se encuentra estudiando la posibilidad de consolidar una planta de reciclaje para éstas para fines agroquímicos (Universidad Nacional de Colombia, A., 2013).

Por otro lado, existe un programa liderado por la Cámara de Electrodomésticos de la Asociación Nacional de Empresarios de Colombia (ANDI) y conformado por las principales compañías del sector de pilas en el país, el cual inició en Bogotá en el año 2010. Para esto se han desarrollado mecanismos de recolección de pilas en diversos canales que incluyen puntos en almacenes de cadena, torres empresariales, centros comerciales, grandes organizaciones, entre otros. De aquí estas son transportadas a un centro de acopio para luego realizar su disposición de una manera segura por una entidad que cuenta con licencia ambiental y se encuentra vigilada para certificar el cumplimiento de los parámetros requeridos. Se debe tener en cuenta que las baterías de celulares y computadores no son recolectadas por este programa (Pilas Colombia, n.d.).

### **Iluminación y luminiscencia**

Los fósforos de los bombillos fluorescentes son ricos en tierras raras pesadas, entre ellos se encuentran europium, terbium e yttrium (Tsamis, A., Coyne, M. 2014).

Hay tres posibles enfoques para la recuperación de estas tierras raras: primero, un reuso directo de los fósforos de los bombillos para producir unas nuevas (limitado a

un mismo tipo de bombillo); segundo, el reciclaje de los componentes del fósforo individual por métodos de separación físico-química; y tercero, un ataque químico en el fósforo para recuperar su componente de tierras raras de la solución por medio de precipitación o extracción del solvente. OSRAM (perteneciente a Siemens) ha patentado un proceso para recuperar todas las tierra raras de fósforos usados, por otro lado Rhodia-Solvey ya ha establecido dos plantas en Francia que están operando desde el 2012) (Tsamis, A., Coyne, M. 2014).

Un punto clave a favor de la recuperación de tierras raras a partir de los bombillos fluorescentes es que en muchos países ya son recolectadas debido a que contienen mercurio, después de esto normalmente se procesan con la intención de reciclar el vidrio, metales y plásticos. Esto permite tener una supply chain completamente elaborada que asegura la recolección del fósforo, un aspecto favorable que no tienen otras fuentes de reciclaje de tierras raras (Tsamis, A., Coyne, M. 2014).

Hay algunas investigaciones para el reciclaje post-consumidor de estos productos (Panayotova, M., Panayotov, V., 2012). En primer lugar se encuentra el reciclaje de yttrium and europium de bombillos de descarga y fluorescentes (OSRAM 2009, Wojtalewicz-Kasprzak 2007); por otro lado se tiene el reciclaje de bombillos y tubos fluorescentes y la salida de una fracción de polvo destilada que contiene hasta el 10% de tierras raras (Guarde et al., 2010); también se están llevando a cabo actividades investigativas que se enfocan en la recuperación de yttrium y europium no sólo de bombillos, sino también de tubos de TV y monitores de computadores (Rabah 2008, Resende and Morais 2010); finalmente en una publicación China se encuentra una visión científica de los métodos de recuperación concebibles para el reciclaje de polvo fluorescente de tierras raras que contiene yttrium, europium, lanthanum y cerium (Mei et al, 2007).

### **Catalizadores**

En el pasado no ha sido muy común hacer reciclaje de tierras raras de los catalizadores gastados en la catálisis industrial o automovilística ya que los precios de estos elementos eran relativamente bajos. Actualmente todavía no es seguro si dicho reciclaje pueda llegar a ser atractivo económicamente en el corto o mediano plazo, esto dependería del precio del lanthanum. El reciclaje de tierras raras de los catalizadores consiste principalmente en la recuperación de lanthanum del craqueo catalítico fluido (Fluid catalytic cracking o FCC), el potencial de la recuperación del mismo es significativo, ya que se tiene un flujo de masa mundial de 600000t al año con un contenido del 2% de tierras raras (Panayotova, M., Panayotov, V., 2012).

También es importante añadir que las investigaciones del Öko-Institut y Umicore muestran que las relaciones entre las empresas relacionadas con la catálisis, proveedores y consumidores, permiten que se tenga un margen de recolección de elementos del grupo del platino de casi el 100%. Actualmente el reciclaje desde la catálisis automovilística se centra en los anteriores elementos, por lo que las tierras raras no figuran por el momento, en este caso principalmente el cerium (Panayotova, M., Panayotov, V., 2012).

En este caso particular todavía hace falta hacer investigaciones sobre las técnicas de recuperación factibles y económicamente aceptables de elementos en este tipo de procesos. Así mismo no se sabe si en el futuro se haga un reciclaje de tierras raras desde los catalizadores gastados de automoción (Panayotova, M., Panayotov, V., 2012).

### 6.1.2.3 Análisis de las alternativas identificadas

Tabla 4. Resumen de las alternativas de recuperación de las tierras raras

Resumen: Comparación entre alternativas de Recuperación de las Tierras Raras												
Producto	Categoría/ Aplicación	REEs a recuperar	Métodos	Variables								
				Cantidad presente de REEs (g/und)	Eficiencia en el proceso de recuperación	Participación en la demanda total de REEs	Etapas de tecnología	Industria	Estudios			
Discos Duros	Imanes permanentes	Nd, Pr, Tb, Dy	Hidrometalurgia (H), pirometalurgia (P) y métodos de extracción en fase gaseosa (G)	15-22	55%	37%	H: General- mente maduro (sigue a escala de laboratorio), P: Maduro en otros campos (no REEs), G: Escala de laboratorio	Proyecto de Inversión - Rhodia (H) No existe (P y G)	(Buchert et al., 2011)(Buchert et al., 2012)(Schüler et al., 2011)(Tsamis, A., Coyne, M. 2014)(Panayotova, M., Panayotov, V., 2012) (Pehlken, A., Zimmermann, T., 2012) (Goonan, T., 2011) (Binnemans et al., 2013)			
Unidades Ópticas				5								
Altavoces				50 (NdFeB) o 153								
Teléfonos inteligentes				5								
Turbinas de viento				Dy 18,15, Nd 198, 83, Tb 0,54 [Kg/MW]								
Vehículos híbridos/eléctricos				Nd 200g, Dy 30g								
Pantalla LCD	Fósforos y luminiscencia	Eu, Y, Ce, Gd, Tb, La	n.d.	1,5-2,5	80% (Fósforo de lámparas)	32%	Sin estudios	No	(Buchert et al., 2011)(Buchert et al., 2012)(Schüler et al., 2011)(Tsamis, A., Coyne, M. 2014)(Panayotova, M., Panayotov, V., 2012) (Binnemans et al., 2013)			
TV LCD				4,5-6								
TV PLASMA				100-125								
Laptop				0,05-0,6								
Bombillos fluorescentes (promedio del mercado)				Ataque químico de los fósforos y recuperación de las REEs de la solución por precipitación o extracción del solvente						La 0,35, Ce 0,46, Eu 0,20, Tb 0,19, Y 2,87	Maduro (sigue en desarrollo)	Sí (Rhodia)
Baterías NiMH	Aleaciones de metales/ Baterías	La, Ce, Pr, Nd	Combinación de fundición a temperaturas extra altas e hidrometalurgia/ pirometalurgia	8-10%	50% (Baterías NiMH)	14%	Madura	Sí (Umicore y Rhodia)	(Buchert et al., 2011)(Schüler et al., 2011)(Tsamis, A., Coyne, M. 2014) (Panayotova, M., Panayotov, V., 2012) (Binnemans et al., 2013)			
Catalizadores en procesos químicos y automotores	Catalizadores	Ce, La	Recuperación de lanthanum del craqueo catalítico fluido	2%	n.d.	5%	Jóven - En investigación	No	(Panayotova, M., Panayotov, V., 2012)			

\*9% restante en vidrio, pulido y cerámica. Recuperación basada en procesos químicos e hidrometalúrgicos. Investigaciones y tecnología a escala de laboratorio, no presente en la industria.

#### **6.1.2.4 Selección de alternativas factibles para la industria**

En la tabla No. 4, se puede ver que entre todos los productos que tienen entre sus componentes tierras raras, aquellos de los cuales se están recuperando estos materiales en la industria (o se empezará a realizar a corto o mediano plazo) son todos aquellos que usan imanes permanentes, las baterías NiMH y los bombillos fluorescentes. Por este motivo, no es factible seleccionar alguna alternativa de recuperación para los demás productos, pues aunque se tenga grandes cantidades de estos para hacer la recuperación, si la tecnología para la misma no está lo suficientemente desarrollada, sólo se podrá efectuar en el largo plazo, si es que se investiga en ese campo actualmente. Y, llegados a ese punto, la situación puede cambiar radicalmente, teniendo una mayor cantidad de otro producto en inventario, perdiendo tiempo y costos de oportunidad.

Entre estas tres categorías, la de mayor participación en el mercado son los productos que usan imanes permanentes, seguido de los bombillos fluorescentes, con una diferencia del 5%. Sin embargo, la eficiencia en el proceso de recuperación de los bombillos fluorescentes es mucho más alta que la de imanes, siendo 80% y 55% respectivamente. Sin embargo, en el caso de los imanes permanentes se tiene una concentración mucho mayor de tierras raras en cada unidad de producto, pues un bombillo fluorescente tiene 4,07g/und (Buchert et al., 2011), mientras que el producto con menor concentración de tierras raras entre los imanes permanentes cuenta con 5g/und (unidades ópticas o teléfonos inteligentes), seguido de discos duros, que tienen desde 15 hasta 22 g/und (Buchert et al., 2011). Si a este último producto se le aplica la eficiencia del proceso, se obtendría el doble de la cantidad de tierras raras contenida en un bombillo fluorescente antes de iniciar el proceso de recuperación.

En el campo de imanes permanentes hay una cantidad grande de productos diferentes, con diseños y tamaños distintos, a los cuales habría que hacerles procesos de desensamble y tratamiento diferentes. De todas formas, centrándose sólo en los computadores, se puede obtener tierras raras del disco duro, los altavoces y la unidad óptica (si la tiene), contando con una gran cantidad de insumos para la recuperación. Y, si se quiere expandir el negocio a largo plazo, se puede hacer a un costo mucho menor, pues ya se cuenta con la infraestructura básica para la recuperación de este tipo de productos.

Por todo lo anterior se puede concluir que actualmente el proceso de recuperación más llamativo para la industria es el de hidrometalurgia para los imanes permanentes, cuya tecnología se encuentra actualmente a escala de laboratorio, pero que se encuentra en un proyecto de inversión con la compañía Rhodia (Tsamis, A., Coyne, M. 2014).

El proceso de hidrometalurgia (también conocido como lixiviación) consiste en poner los metales en una solución acuosa a baja temperatura, para luego alcanzar más de 90°C en condiciones atmosféricas, y finalmente llegar a más de 200°C bajo presión para separar los diferentes elementos y compuestos. Existen varios procesos para esto, los cuales pueden usar soluciones acuosas básicas (con un pH alto) o ácidas (con un pH bajo). Este procedimiento normalmente aumenta la entropía de los metales al principio, antes de recuperar los materiales de la solución haciendo uso de un aporte de energía significativo para poder reducir dicha entropía (UNEP, 2013). Las tierras raras pueden ser precipitadas de dicha solución haciendo uso de ácido oxálico o fluoruro de hidrógeno (Panayotova, M., Panayotov, V., 2012).

Hay varias investigaciones destacadas en este campo. En primer lugar Tang et al. (2009) hicieron una comparación de dos métodos que hacían uso de una precipitación de doble sal de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  y una precipitación secundaria de oxalato que logró una tasa de recuperación de  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  de más del 82%. Por otro lado Zang et al. (2010) desarrollaron una investigación de un método de separación que se basa en una reducción eléctrica mediante una extracción p507, lo cual permitiría alcanzar una tasa de recuperación del 96,1%, ahorrando aproximadamente 650 Euros por tonelada de tierras raras recuperada respecto al consumo de materiales y costos del proceso, esto al compararlo con los métodos tradicionales de separación. Finalmente Lyman y Palmer (1992) desarrollaron un proceso de separación que consiste en la lixiviación de los residuos en una solución acuosa de  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , se debe tener en cuenta que para disolver 1Kg del imán de Neodymium (NdFeB) se necesitan 10L de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  2 M.

Los métodos hidrometalúrgicos tienen como ventaja que generalmente aplican a todo tipo de composiciones de imanes, al igual que a aleaciones oxidadas y no oxidadas, así mismo conserva los mismos pasos en el procedimiento de extracción de tierras raras como de minerales primarios. Como desventaja se observa que se necesita de muchos pasos del procedimiento para poder obtener nuevos imanes, así mismo consume una alta cantidad de químicos y se generan altas cantidades de agua residual (Binnemans et al., 2013).



## **6.1.4 Potencial de la minería inversa en Colombia**

### ***6.1.4.1 Inventario disponible en Colombia***

Para analizar el inventario en Colombia es importante destacar que en el país no hay empresas que produzcan alguna de las aplicaciones de las tierras raras y como se pudo observar en la Figura 7, actualmente no existen minas de las que se puedan extraer estos materiales. Por todo lo anterior el inventario disponible se basa en el análisis de las importaciones de los productos que posean estos elementos en su composición, y de antemano se descartan las posibilidades de obtenerlos a partir de productos en proceso.

Se analizaron los datos desde el 2008 al 2014 y a partir de los mismos se pronosticó hasta el año 2020, con el fin de tener una visión más clara de la futura demanda de productos con tierras raras en Colombia, y de esta manera proyectar la oportunidad y el potencial de un negocio de recuperación de este tipo de materiales críticos en el país.

La razón por la que no se usó una mayor cantidad de datos históricos para la realización del pronóstico es debido a que el proyecto consiste en el análisis de productos tecnológicos, como se sabe dichas tecnologías avanzan rápidamente, todo el tiempo se lanzan al mercado nuevos aparatos que tienden a dejar a los anteriores obsoletos, desapareciendo totalmente la demanda de los mismos. De igual manera, el mundo se encuentra en una revolución tecnológica en la que el consumo se ha disparado radicalmente. Tomar datos de años anteriores no es beneficioso, ya que en vez de hacer más exactos los cálculos, podría distorsionar los pronósticos. Por esto mismo se decidió hacer el pronóstico de varios periodos con la proyección de tendencias.

A partir de la información encontrada acerca de los productos existentes con tierras raras se revisaron las partidas arancelarias de Colombia y se encontró que los destacados en el país son: baterías, pilas, celulares, computadores personales, productos médicos y productos con tecnología LED. En la siguiente gráfica se puede ver un resumen de los resultados de las cantidades importadas de los productos mencionados anteriormente, desde el año 2008 hasta el 2014.

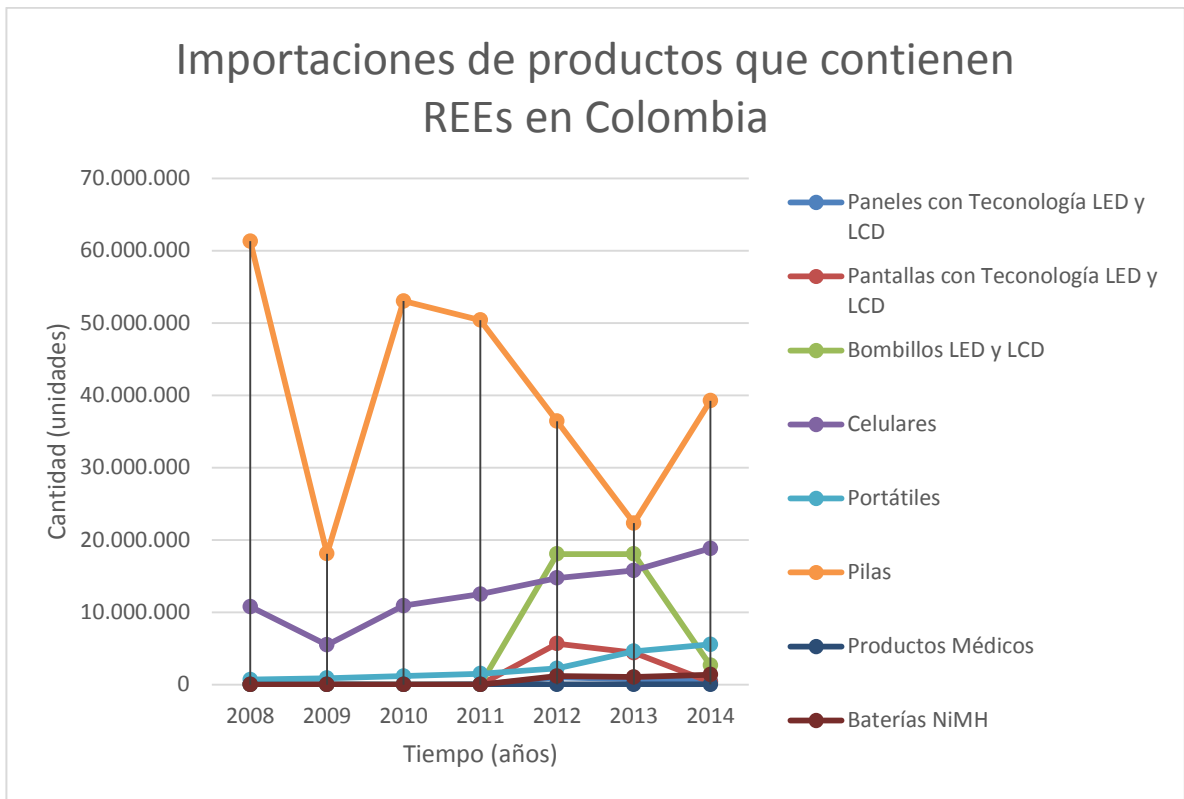


Figura 9. Cantidad de importaciones en unidades de productos que contienen REEs en Colombia (Adaptado de LEGISCOMEX, 2015)

De la Figura 9 se puede concluir que las pilas actualmente son el producto que tiene una mayor demanda. Los celulares ocupan la segunda posición en cuanto a abundancia y poseen una buena pendiente de crecimiento; así mismo los portátiles también tienen un buen crecimiento en comparación a la tecnología LED y LCD que disminuyen significativamente; por otro lado las importaciones de productos médicos y las baterías de NiMH son casi insignificantes en comparación con las demás. Así mismo se debe aclarar que aunque la recuperación de materiales críticos de pantallas con tecnología LED y LCD y de bombillos LED y LCD son muy llamativos debido a la gran cantidad de tierras raras que se pueden recuperar de los mismos y otras ventajas que se mencionaron con anterioridad, se deben descartar en este punto, pues no se cuenta con datos históricos suficientes para hacer una proyección, en la figura analizada se puede ver que sólo se tienen datos desde el 2012.

A partir de lo anterior se decide que los datos de importaciones de productos que contienen tierras raras a proyectar son los de las pilas, celulares y procesadores. Esto se debe a que, como se dijo previamente, los procesos de reciclaje son costosos y especializados por producto y por material a recuperar, por lo tanto se deben analizar

aquellos de los cuales se tenga una cantidad significativa en inventario y que al mismo tiempo se pueda recuperar una mayor cantidad de materiales críticos.

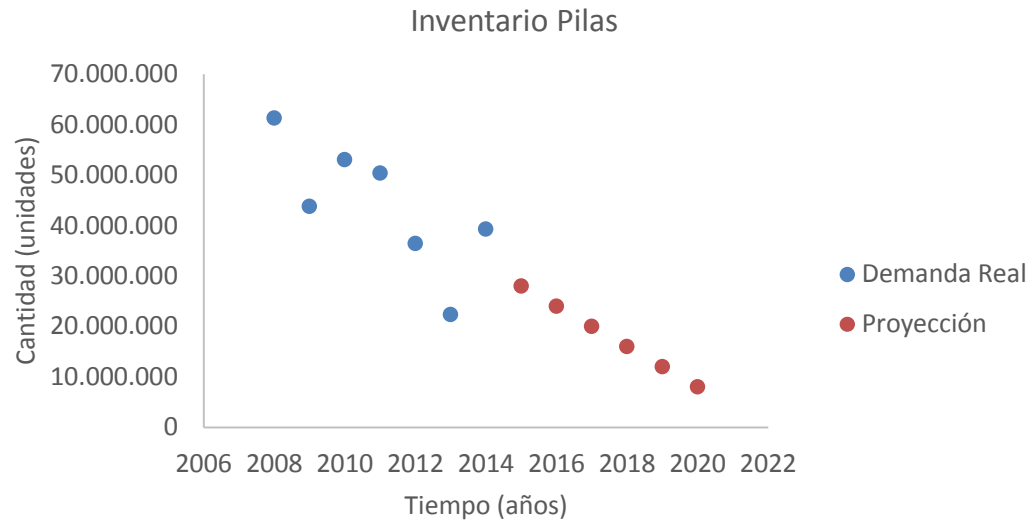


Figura 10. Proyecciones de inventarios de pilas (Adaptado de LEGISCOMEX, 2015)

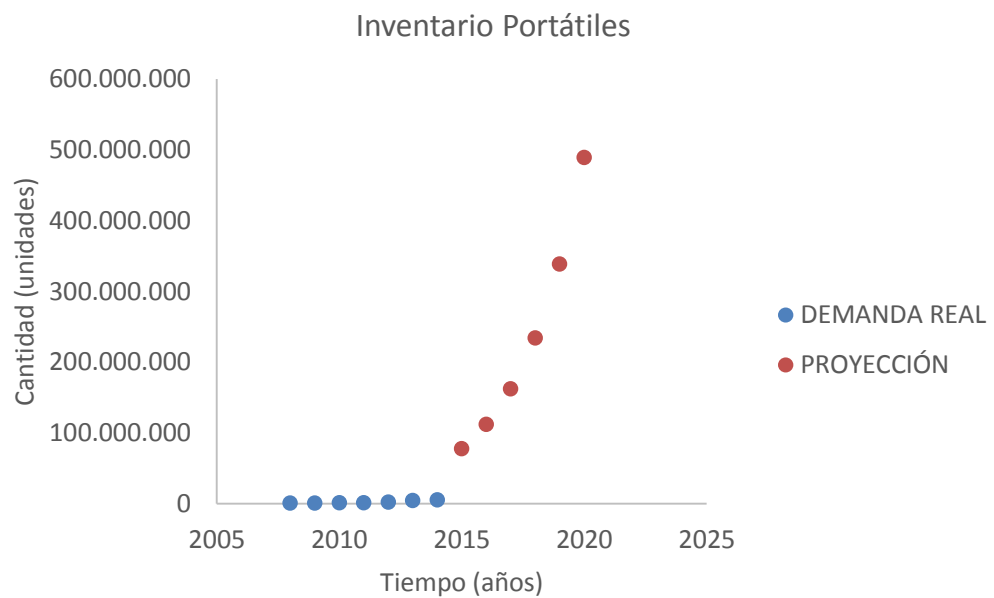


Figura 11. Proyecciones de inventarios de portátiles (Adaptado de LEGISCOMEX, 2015)

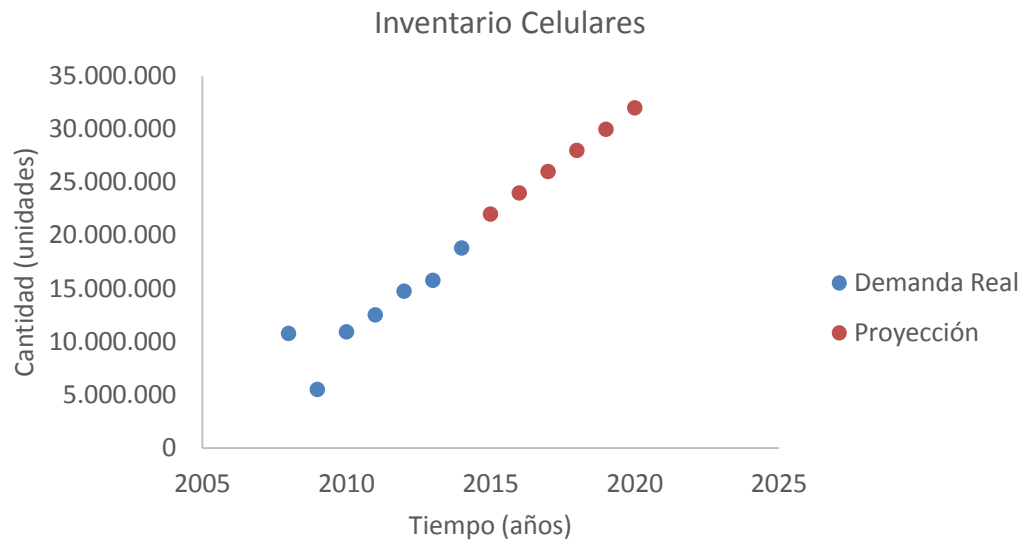


Figura 12. Proyecciones de inventarios de celulares (Adaptado de LEGISCOMEX, 2015)

Por medio de Excel se encontró la ecuación que mejor describe a cada uno de los inventarios de los productos basándose en el escenario A, del cual se habla en el punto 6.1.1.3, que consiste en crear una proyección a partir de datos históricos, proyectando de acuerdo a la tendencia que se ha creado desde el año 2008 al 2014. En el caso de las pilas (Figura 10) y los celulares (Figura 12) una línea recta es la tendencia que mejor se ajusta a los datos con una correlación de 0.58 y 0.76 respectivamente, cabe destacar que mientras el pronóstico de las pilas tiene una pendiente negativa, los celulares tienen una positiva. Para los datos de los portátiles (Figura 11) se ajusta mejor una ecuación exponencial con una correlación de 0.97. Por lo anterior se puede decir que en el futuro se contarán con unas reservas mayores de celulares y portátiles, mientras que las de las pilas con contenidos de tierras raras tenderán a disminuir.

### ***6.1.4.3 Cuantificación del potencial de recuperación en Colombia***

Para empezar a cuantificar el potencial de recuperación de las tierras raras en Colombia se compararon los datos de la Figura 9 junto al análisis de las alternativas identificadas. Como se mencionó anteriormente, aquellos productos que se han importado al país y de los que se tienen datos son: celulares, computadores portátiles, pilas, baterías NiMH y bombillos. Estos últimos fueron catalogados en los métodos de recuperación descritos, para así poder determinar la cantidad total de tierras raras que se podría recuperar, teniendo en cuenta la eficiencia del proceso y el porcentaje de tierras raras contenido por unidad.

En el método presentado para las aleaciones de metales, la cantidad a recuperar de tierras raras depende del peso de la batería, puesto que el 9% del peso de la misma pertenece a dichos elementos. En la partida arancelaria de Baterías NiMH se puede encontrar gran variedad de baterías, desde baterías de carros hasta baterías de celulares, pasando por aquellas usadas en computadores portátiles, sistemas de seguridad y música. Debido a que la información con la que se contaba en la base de datos no permitía determinar la cantidad perteneciente a cada tipo de batería, y que los productores no eran conocidos o podrían manejar todos los tipos, no se pudo realizar ningún tipo de clasificación por producto. Es por esto que para poder cuantificar la recuperación de este grupo consideraron cuatro escenarios: uno en el que la totalidad de baterías NiMH importadas pertenezcan a carros, otro en el que todas serían de computadores portátiles, uno en el que sólo sean baterías de celulares y finalmente uno en el que los tres productos se importan en igual cantidad, o sea un 33,33%. Esto se puede ver en las gráficas presentadas a continuación, la cantidad de tierras raras a recuperar varía drásticamente, ya que esto depende del peso neto del producto, el cual difiere en gran medida para cada escenario. (El escenario 2 y el 3 son muy pequeños en comparación a los otros dos, por esta razón gráficamente no se pueden detallar con claridad)

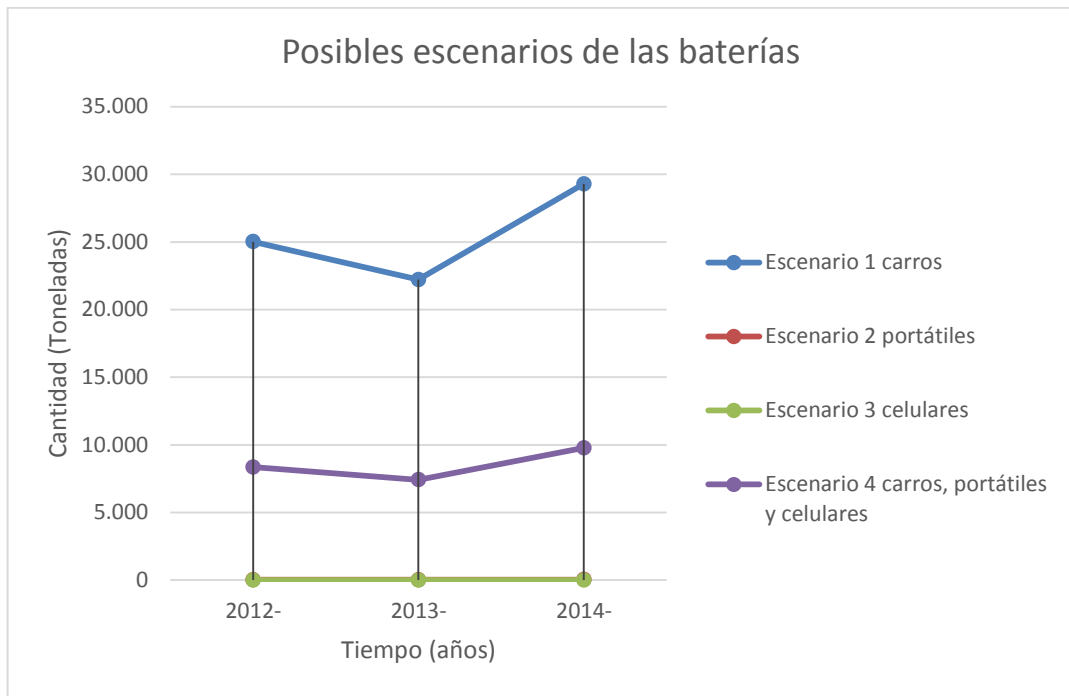


Figura 13. Escenarios Baterías

Para comparar esta categoría con los otros productos que se están teniendo en cuenta, se van a tomar los datos obtenidos en el escenario 4, debido a que los resultados tienen en cuenta una variedad más grande de productos, por lo que probablemente se encuentre menos sesgado que los demás.

A continuación se puede observar una gráfica que compara la cantidad (en toneladas) que se puede recuperar de tierras raras de las unidades de cada producto, dicha comparación se hace teniendo en cuenta el año de importación y no el momento en el que se podría recuperar, debido a la diferencia en la vida útil de los productos. Éste último análisis, que muestra el potencial de recuperación, se presentará más adelante.

En la primera grafica se encuentran todos los productos de los cuales existe un método de recuperación (celulares, portátiles, pilas, baterías, bombillos) y la cantidad a recuperar de cada uno de ellos, y en la segunda no se tuvo en cuenta las baterías para poder apreciar mejor la cantidad de los demás productos.

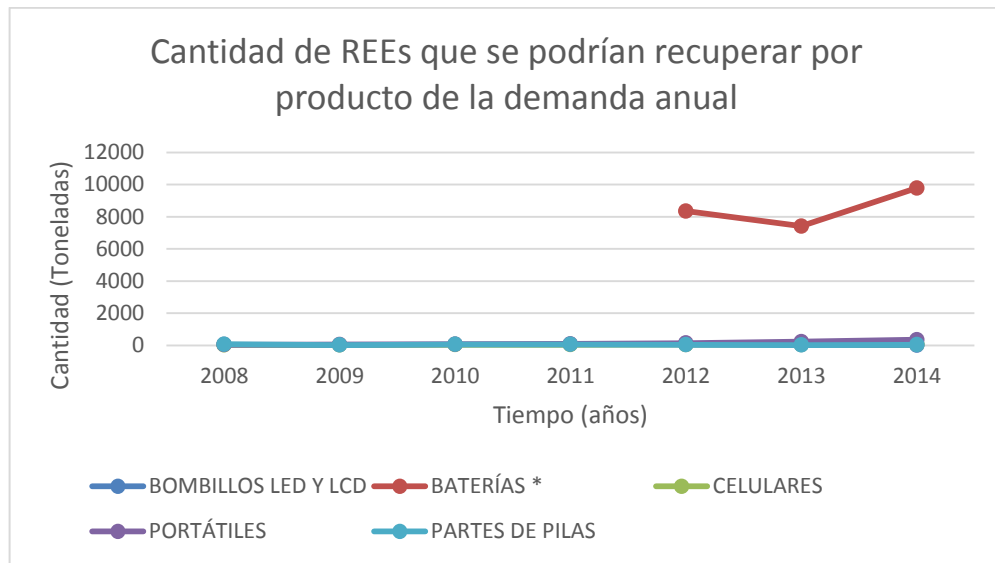


Figura 14. Cantidad de REEs a recuperar por producto de acuerdo a la demanda anual

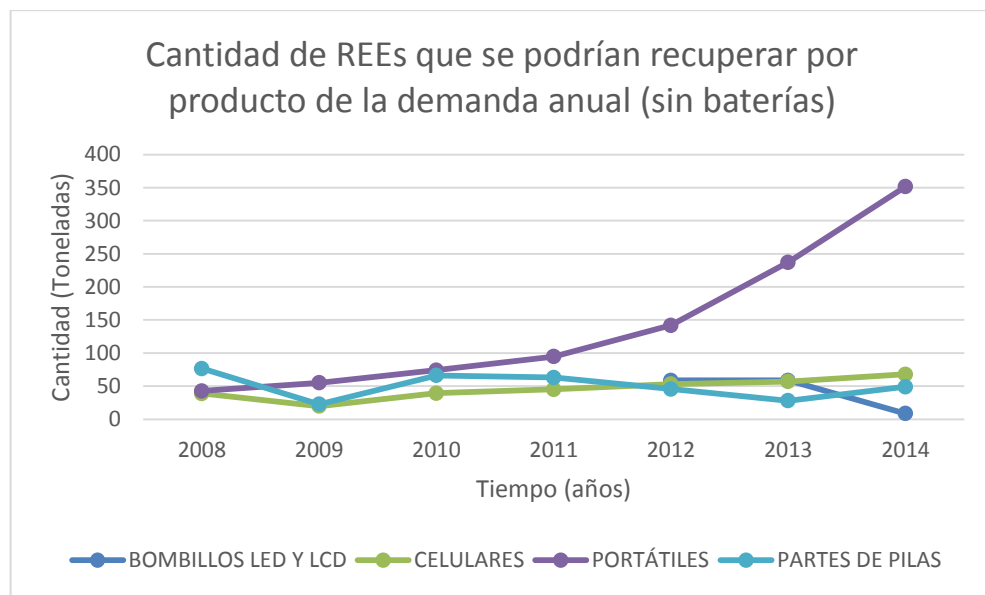


Figura 15. Cantidad de REEs a recuperar por producto de acuerdo a la demanda anual sin tener en cuenta las baterías.

En la Figura 9 se pudo observar la demanda de los productos con tierras raras en unidades; sin embargo, este dato puede distorsionar la información, pues aunque haya una gran cantidad de unidades de un producto no significa que sea del que más se puede recuperar. Esto se puede notar al contrastar la Figura 9 con la 14 y 15, un ejemplo de esto es que en la Figura 9 la cantidad en unidades de pilas es la más alta, mientras que en las otras dos no sobresalen en comparación con los demás productos.

Con las baterías pasa lo contrario, en la Figura 9 no es llamativo por la aparentemente baja cantidad de unidades con las que se cuenta, mientras en las otras dos figuras se puede notar que es del que más toneladas de tierras raras se podrían recuperar.

De acuerdo a lo anterior, se podría decir que lo mejor sería realizar la recuperación de baterías de NiMH; sin embargo, como se dijo anteriormente, estas baterías ya están siendo reemplazadas por baterías de Li-ion que tienen más beneficios como por ejemplo mayor duración, por lo que a corto plazo va a haber una muy pequeña cantidad de baterías de NiMH de las cuales se puedan recuperar dichos materiales, dejando a la industria de recuperación sin materia prima para procesar; además no se tiene la suficiente información para establecer un pronóstico, ya que sólo se cuentan con datos a partir del 2012. Por este motivo se recomienda que este tipo de productos sean vendidos a otras empresas que ya estén recuperando tierras raras por medio de este método, como por ejemplo Solvay o Umicore.

En segundo y tercer lugar se encuentran computadores portátiles y celulares respectivamente, que a parte de sus baterías, se pueden recuperar tierras raras de otras partes del producto, como el disco duro o los altavoces, con un método que ya es aplicable a la industria, llamado Hidrometalurgia.

Finalmente se encuentran los bombillos, que aunque tentativamente el proceso de recuperación por ataque químico tiene un alto porcentaje de recuperación en comparación con los demás métodos (80%) no hay información suficiente para establecer un pronóstico, pues se tienen datos a partir del año 2012. Así mismo, la cantidad importada, en comparación con los demás productos estudiados, tampoco es llamativa. En este caso también podría estudiarse la posibilidad de vender los residuos del producto a una empresa que ya lo esté recuperando, o se puede tener en cuenta para un futuro estudio.

Para la recuperación es vital tener en cuenta en qué momento estos productos dejen de servir para lo que fueron concebidos, y es aquí donde se debe aplicar la logística reversiva para su correcta disposición, reciclaje o aplicar minería inversa. Para ello se tuvo en cuenta la vida útil de los productos principales (celulares, portátiles y pilas), datos que se encuentran en la tabla a continuación.



Tabla 5. Vida útil de los productos

Vida útil		
Producto	Años	Referencia
Portátiles	5	<a href="#">Chron, 2015</a>
Celulares	3	<a href="#">US EPA, 2015</a>
Pilas	1	<a href="#">Conicet Mendoza, 2015</a>

A continuación se presentan las figuras que comparan las unidades de cada producto con las que se podría contar por año y la cantidad (en toneladas) de tierras raras a recuperar de las mismas en el momento en el que se pueda realizar dicho proceso, lo cual muestra el potencial de recuperación de cada producto. Es importante tener en cuenta que los portátiles y los celulares aplican para dos categorías de la Tabla 4, en imanes permanentes y en aleaciones de metales o baterías, por esta razón en las figuras 17 y 18 se tiene en cuenta la cantidad agregada a recuperar si se aplicaran ambos procesos al producto.

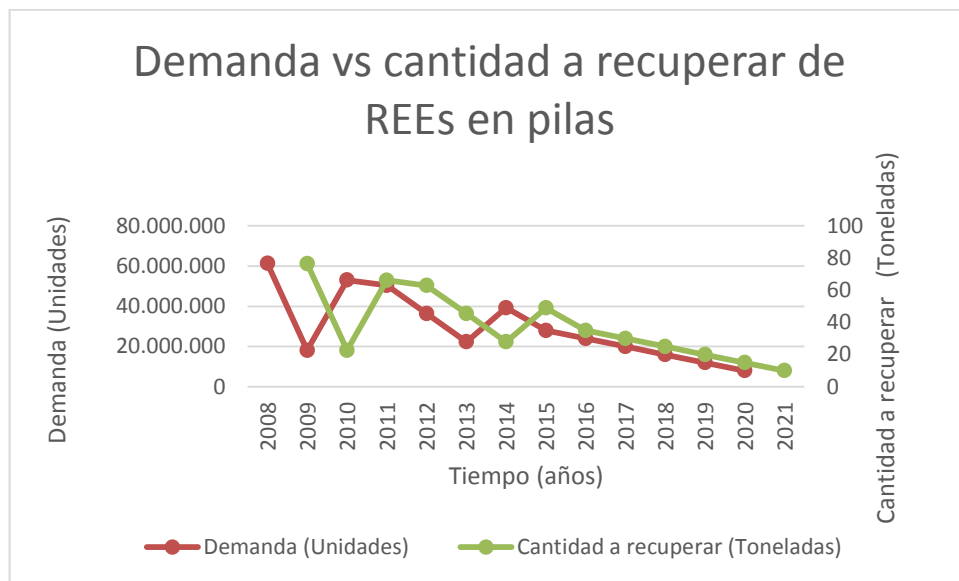


Figura 16. Comparación entre la demanda y la cantidad a recuperar (Toneladas) de REEs en pilas

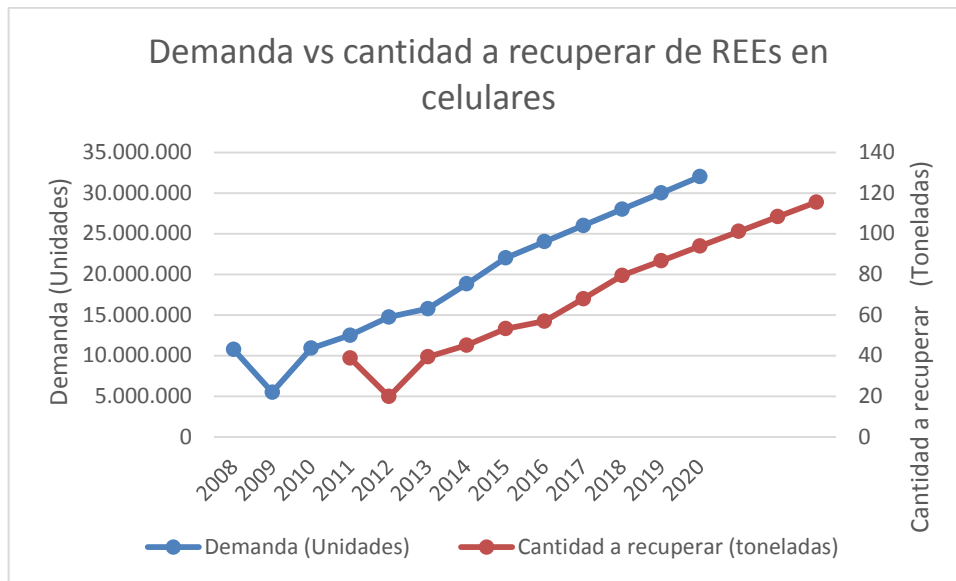


Figura 17. Comparación entre la demanda y la cantidad a recuperar (Toneladas) de REEs en celulares

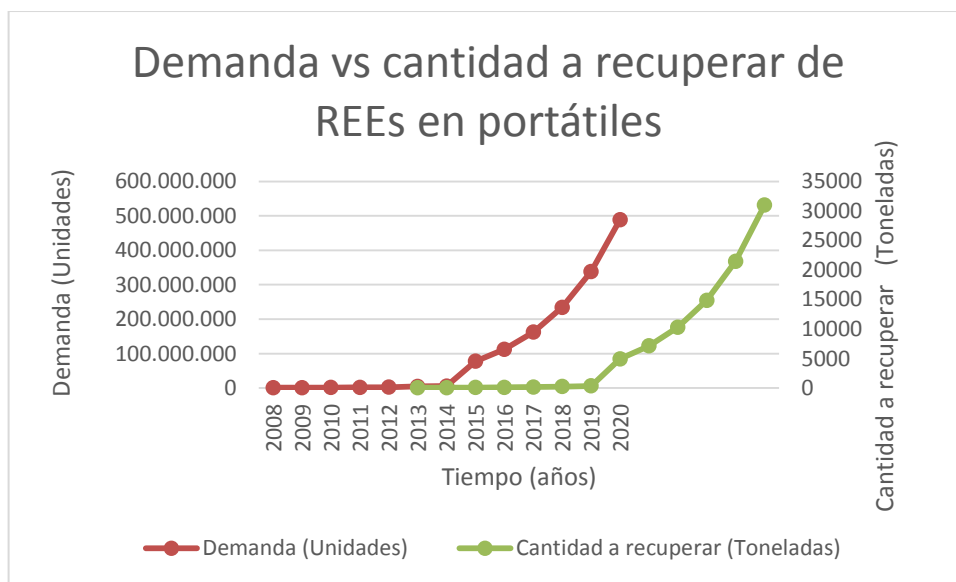


Figura 18. Comparación entre la demanda y la cantidad a recuperar (Toneladas) de REEs en pilas

Es importante no sólo comparar los productos con su respectiva cantidad a recuperar, sino también los métodos de recuperación, porque como se dijo anteriormente son procesos costosos y dedicados. Debido a esto, a continuación se puede observar una figura que muestra la cantidad de tierras raras que se podría recuperar de las dos

categorías que, como se mencionó anteriormente, podrían aplicarse al contexto colombiano, los imanes permanentes y las aleaciones de metales o baterías.

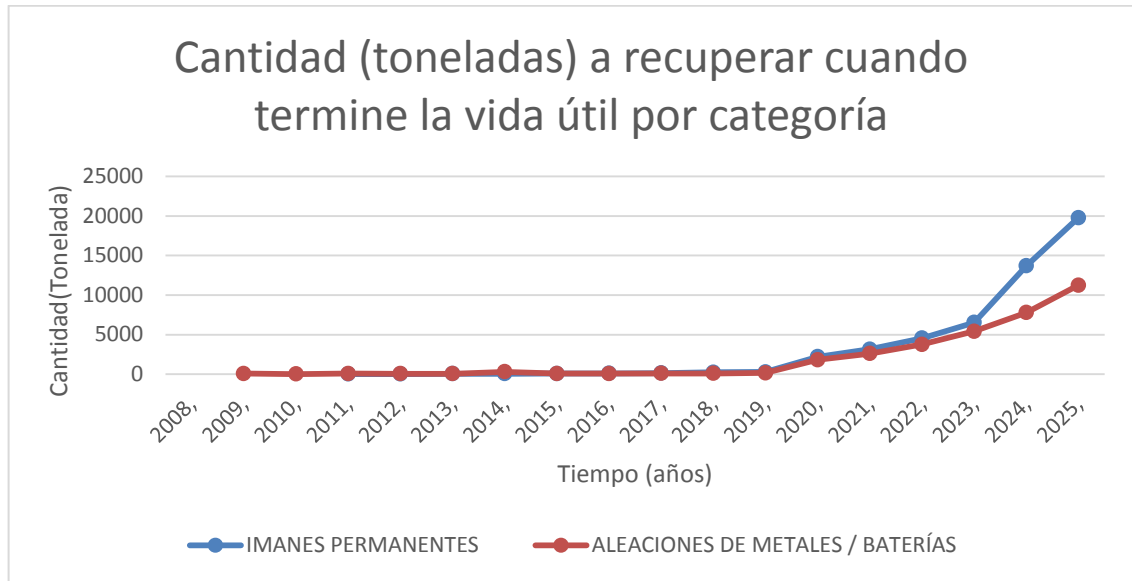


Figura 19. Comparación entre la demanda y la cantidad a recuperar (Toneladas) de REEs en las categorías imanes permanentes y aleaciones de metales/baterías

En la gráfica anterior se puede observar que a mediano plazo la cantidad de materiales que puede recuperarse de productos que usen imanes permanentes va en incremento, mientras que para las baterías el crecimiento tiene una pendiente menor, a esto debe sumarse que probablemente su uso se suspenda al verse reemplazadas por baterías de litio.

#### 6.1.4.4 *Análisis de los aspectos logísticos y geográficos del país*

Basándose en la información que brindan los datos de las importaciones acerca de los departamentos a los cuales se dirigen los productos con materiales críticos en Colombia, se puede encontrar una región en el país en la que se concentra la mayor cantidad de los mismos, y la que, inicialmente, se podría considerar como una buena ubicación para la planta de recuperación.

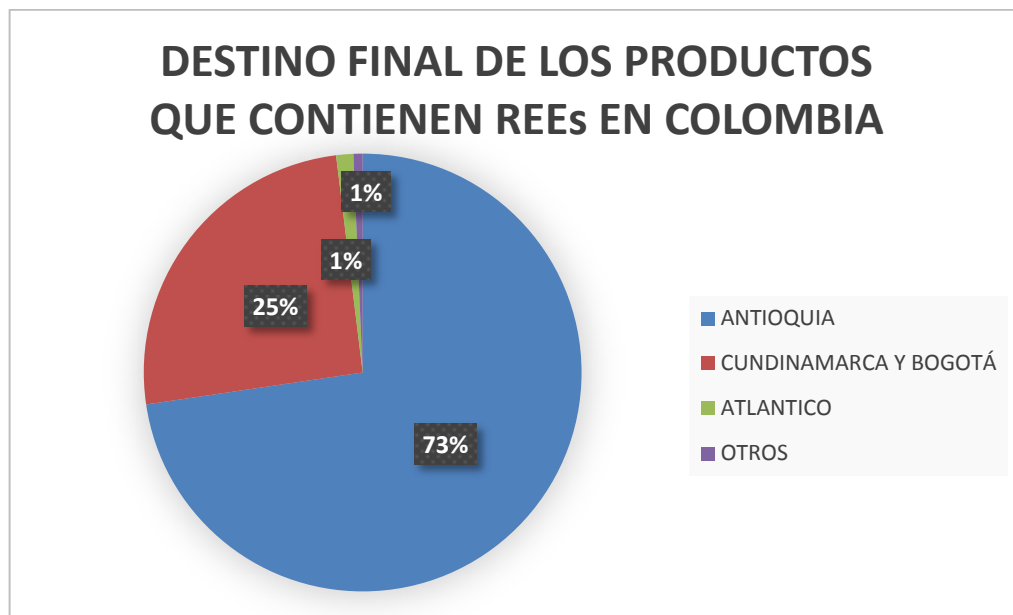


Figura 20. Destino final de las importaciones de productos que contienen REEs en Colombia (Adaptado de LEGISCOMEX, 2015)

En primer lugar se encuentra Antioquia con el 73% de las entradas de estos productos al país, seguido por Cundinamarca con 25% y finalmente Atlántico con un 1%. Por lo tanto se podría suponer que Antioquia sería un buen lugar para ubicar la planta de recuperación, ya que podría evitar desplazamientos innecesarios.

Sin embargo, como se mencionó anteriormente, una mayor cantidad de productos no significa una mayor recuperación, ya que la cantidad a recuperar de cada uno y la eficiencia del proceso hace variar el potencial del mismo. Es por esto que se debe tener en cuenta la ubicación en la que se encuentra la mayor cantidad de tierras raras (esto también está relacionado con el tamaño del producto del cual se extraerán los materiales) a recuperar, que vendría a ser el lugar donde más convendría montar una planta o la línea de recuperación. Esta información se encuentra a continuación.

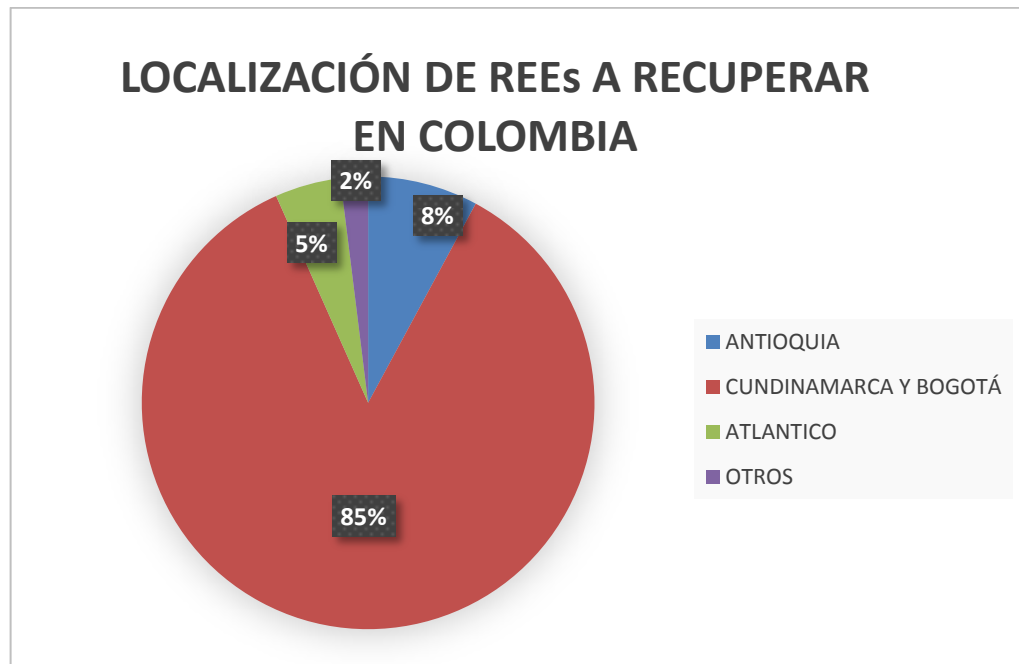


Figura 21. Localización de las REEs a recuperar en Colombia (Adaptado de LEGISCOMEX, 2015)

Como se puede observar los lugares y porcentajes cambian, dando como resultado Cundinamarca junto a su capital en el primer lugar, seguido por Antioquia y finalmente Atlántico.

Por otro lado, se debe revisar el marco legal que entra a regir en este tipo de negocio. De acuerdo a la Ley No. 1672 del 19 de julio de 2003, cada persona natural o jurídica que importe, produzca, comercialice o consuma aparatos eléctricos y electrónicos, debe gestionar sus respectivos residuos. Es decir, ellos mismos deben encargarse del proceso de logística reversiva de aquellos productos, por lo que deben contar con un canal para el transporte de estos productos.

El decreto 1076 del 2015 dice que las restricciones de cada planta de recuperación de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEEs) depende de cada departamento, por lo tanto para la continuación del proyecto es importante tener en cuenta las restricciones de la región elegida.

Después de la recuperación de las tierras raras se debe tener en cuenta que elementos como el *Cerium* o el *Praseodymium* entre otros son considerados como carga peligrosa, por tanto se debe contar con un procedimiento especial para su transporte.

Tabla 6. Empresas en Barranquilla que realizan actividades de recuperación de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEEs) (Rae.org.co, 2014)

<b>Barranquilla</b>				
<b>Empresa</b>	<b>Area</b>	<b>Teléfono</b>	<b>Página Web</b>	<b>Dirección</b>
Lito Ltda.	Transformadores y aceites con PBC, reciclaje de neveras, bombillos	(5) 344 51 65	<a href="http://www.litoltda.com">www.litoltda.com</a>	Calle 6 # 47-56

Tabla 7. Empresas en Bogotá que realizan actividades de recuperación de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEEs) (Rae.org.co, 2014)

<b>Bogotá</b>				
<b>Empresa</b>	<b>Area</b>	<b>Teléfono</b>	<b>Página Web</b>	<b>Dirección</b>
Gaia Vitare	Despiece y reciclaje de RAEE	(1) 421 6592	<a href="http://www.gaiavitare.com">www.gaiavitare.com</a>	Carrera 123 # 14-21 Bodega 5
Lito Ltda.	Transformadores y aceites con PBC, reciclaje de neveras, bombillos	(1) 405 73 73	<a href="http://www.litoltda.com">www.litoltda.com</a>	Calle 12B # 36-81
Lasea Soluciones	Gestor de residuos peligrosos	(1) 292 93 29	<a href="mailto:laseasoluciones@yahoo.com">laseasoluciones@yahoo.com</a>	Carrera 80 # 16D-11
Belmont Trading	Acopio y exportación de RAEE	(1) 638 60 70	<a href="http://www.belmont-trading.com.co">www.belmont-trading.com.co</a>	Carrera 18 # 86 A-14
Computadores Para Educar	Despiece de computadores, monitores e impresoras	(1) 344 22 58	<a href="http://www.computadoresparaeducar.gov.co">www.computadoresparaeducar.gov.co</a>	Carrera 8 entre Calles 12 y 13

Tabla 8. Empresas en Cali que realizan actividades de recuperación de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEEs) (Rae.org.co, 2014)

<b>Cali</b>				
<b>Empresa</b>	<b>Area</b>	<b>Teléfono</b>	<b>Página Web</b>	<b>Dirección</b>
Lito Ltda.	Transformadores y aceites con PBC, reciclaje de neveras, bombillos	(2) 664 47 91	<a href="http://www.litoltda.com">www.litoltda.com</a>	Carrera 32 # 10-127(Arroyohondo, Yumbo)

Tabla 9. Empresas en Cartagena que realizan actividades de recuperación de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEEs) (Raee.org.co, 2014)

Cartagena				
Empresa	Area	Teléfono	Página Web	Dirección
C.I.Recycables	Despiece de RAEE, reciclaje de PWB, exportación de materiales	(5) 657 12 73	<a href="http://www.recycables.com.co">www.recycables.com.co</a>	Diagonal 30 # 54-284

Tabla 10. Empresas en Medellín que realizan actividades de recuperación de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEEs) (Raee.org.co, 2014)

Medellín				
Empresa	Area	Teléfono	Página Web	Dirección
ASEI Ltda.	Acopio y despiece de RAEE	(4) 377 20 85	<a href="http://www.aseiltda.com">www.aseiltda.com</a>	Calle 29 # 41-35 (Itagui)
eCycling S.A.S.	Acopio, despiece y reciclaje de RAEE	(4) 536 25 32	<a href="http://www.ecyclingcolombia.com">www.ecyclingcolombia.com</a> <a href="mailto:a.cominfo@ecyclingcolombia.com">a.cominfo@ecyclingcolombia.com</a>	Glorieta Aeropuerto José María Córdova, 200 m vía Autopista. Ciudad Karga Fase I. Rionegro, Antioquia
Lito Ltda.	Transformadores y aceites con PBC, reciclaje de neveras, bombillos	(4) 232 31 44	<a href="http://www.litoltda.com">www.litoltda.com</a>	Carrera 51 # 32-102
Codesarrollo	Reciclaje de plásticos procedentes de los RAEE	(4) 575 12 10	<a href="http://www.codesarrollo.org.co">www.codesarrollo.org.co</a>	Calle 54 # 45-63

En las tablas anteriores se pueden observar las empresas en Colombia que actualmente se encuentran recuperando residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEEs). Entre sus operaciones se encuentra reciclaje de plásticos, algunos metales (cobre, oro, entre otros), más no de tierras raras. Sin embargo si realiza la exportación de algunos materiales (Raee.org.co, 2014). Teniendo en cuenta la localización de las tierras raras a recuperar, se podría recomendar la adición de una línea de recuperación de tierras raras a alguna de las empresas de Cundinamarca (ya que tiene el 85% del potencial de recuperación), las cuales serían Gaia Vitare, Lito Ltda., Lasea Soluciones, Belmont Trading, y Computadores Para Educar. Ya que el costo de inversión sería mucho menor, al contar con equipos, tecnología, canales de recolección y el espacio físico necesario.

#### ***6.1.4.5 Alternativas de recuperación compatibles con el contexto colombiano***

La alternativa de recuperación compatible con el contexto colombiano es la Hidrometalurgia para los imanes permanentes que se pueden encontrar en productos como los celulares y portátiles. Esto se debe a que la cantidad a recuperar es alta en comparación a los demás, la demanda de los productos de los cuales se pueden recuperar las tierras raras está en crecimiento en el país y el método de recuperación es aplicable a la industria. Así mismo productos como turbinas eólicas y vehículos híbridos o eléctricos contienen dichos imanes y poseen grandes cantidades de tierras raras en ellos, por lo que los insumos para la industria serían cada vez más grandes.

Por otro lado, aunque en el momento existe un gran potencial de recuperación en el caso de las pilas y baterías de NiMH, este es un método que no es conveniente desarrollar actualmente, ya que es un producto que está saliendo del mercado, ya que ha sido reemplazado por otro tipo de pilas y baterías.



## 6.2 Conclusiones

Se lograron caracterizar las diferentes tierras raras teniendo en cuenta su abundancia, sus propiedades y los productos en los que principalmente están siendo utilizados. En primer lugar, se puede observar que los elementos que se encuentran más presentes en la tierra son el Cerium, el Neodymium, el Yttrium y el Scandium; por otro lado la tierra rara que presenta una mayor cantidad de propiedades es Yttrium, seguido por Cerium, Praseodymium, Samarium y Gadolinium en igual medida. Finalmente, de todos los productos que tienen tierras raras entre sus componentes, los que poseen una mayor diversidad de los mismos son los bombillos fluorescentes, las pantallas plasma y las LCD Backlights sin embargo, las tierras raras que se encuentran en una mayor cantidad de productos con principalmente el Terbium, seguido del Cerium, Neodymium e Yttrium.

En cuanto a la posibilidad de sustituir las tierras raras se encontró que es poco usual hacerlo de manera directa, reemplazando un componente que sea una tierra rara por otro, ya que las propiedades del nuevo elemento normalmente no permiten un igual o mejor desempeño del producto, al igual que para hacer dicha sustitución se requeriría hacer un diseño del producto totalmente nuevo en la mayoría de los casos. Así mismo, es probable que dicha solución no sea sostenible, puesto que a futuro se puede llegar al mismo problema que se tiene actualmente con las tierras raras, pero centrado en otros materiales.

Las alternativas de recuperación identificadas se encuentran divididas en cuatro grupos: imanes permanentes, fósforos y luminiscencia, aleaciones de metales y baterías, y catalizadores. Para los imanes permanentes se han investigado tres métodos principales, entre los cuales se pueden encontrar varias propuestas de autores diversos, en primer lugar está la Hidrometalurgia (con un alto desarrollo y proyectos de inversión para la industria), la pirometalurgia (su investigación se encuentra en un estado maduro en campos diferentes a las tierras raras) y métodos de extracción en fase gaseosa (sólo presente a escala de laboratorio). En el caso de fósforos y luminiscencia no se ha investigado profundamente en el campo de las diversas pantallas (ya sean LED, Plasma, displays, entre otros), por lo que no hay un método definido para la recuperación de tierras raras del mismo; sin embargo, en el caso de los bombillos fluorescentes existe un proceso que consiste en realizar un ataque químico de los fósforos, para poder hacer la recuperación de dichos materiales de la solución por medio de precipitación o extracción del solvente, este método se encuentra en estado maduro y está presente en la industria en la compañía Rhodia.

Para las aleaciones de metales y baterías se ha desarrollado una técnica que consiste en una combinación de fundición a temperaturas extra altas e hidrometalurgia o pirometalurgia, esta tecnología es igualmente madura y está presente en Rhodia y Umicore. Finalmente, en el caso de los catalizadores se puede hacer una recuperación de lanthanum del craqueo catalítico fluido, sin embargo en la actualidad hay un mayor interés en recuperar los elementos del grupo del platino, por lo que la investigación se encuentra en un estado muy joven y es poco probable que vaya a tener un desarrollo significativo a mediano plazo.

Para el contexto presente en Colombia se estudiaron los siguientes productos: baterías, pilas, celulares, computadores personales, productos médicos y productos con tecnología LED. En los casos de las baterías y productos con tecnología LED no se pudo hacer una observación de tendencias, pues no se contaban con datos suficientes. Los productos médicos fueron descartados por su baja demanda en comparación con los demás. En los otros se puede concluir que la demanda de pilas se encuentra decreciendo, mientras que la de celulares y computadores portátiles va en aumento, especialmente el último.

En cuanto al potencial de recuperación de tierras raras en Colombia en términos de cantidad se pudo ver que el producto más destacado eran las baterías de NiMH, sin embargo estas ya están siendo reemplazadas por baterías de Li-ion, por lo que a corto plazo va a haber una muy pequeña cantidad de las cuales se puedan recuperar dichos materiales, dejando a la industria sin materia prima para procesar. Luego de las baterías se encuentran computadores portátiles y celulares respectivamente, de los cuales también se pueden recuperar tierras raras de componentes como el disco duro o los altavoces. Finalmente se encuentran los bombillos.

En último lugar se descubrió que el departamento en el que se concentran la mayor cantidad de productos que tienen tierras raras es Antioquia, sin embargo en el que potencialmente se podría recuperar una cantidad más alta de estos elementos es Cundinamarca, con un 85% de la totalidad de materiales, por lo que si se decide realizar alguna acción en este campo, ésta sería la localización más favorable para hacerlo.

### 6.3 Recomendaciones

En cuanto al análisis realizado se recomienda que productos como las pilas y baterías de NiMH y los bombillos fluorescentes sean exportados y vendidos a otras empresas que actualmente ya estén haciendo la recuperación de los mismos (como Solvay o Umicore), pues su demanda está decreciendo o no es lo suficientemente alta. Por otro lado, el desarrollo de una planta de recuperación de tierras raras de productos que usen imanes permanentes (como computadores portátiles y celulares) es bastante llamativo, ya que tiene un alto potencial de recuperación en términos de cantidad, su demanda se encuentra en aumento y se espera que ingresen al mercado más productos de este tipo muy llamativos para la población (como los vehículos híbridos o eléctricos).

De acuerdo a los resultados de la investigación, se recomienda estudiar la posibilidad de desarrollar una planta de recuperación de tierras raras de productos que hagan uso de imanes permanentes por medio del método de hidrometalurgia. Sin embargo, los aspectos logísticos necesarios para poder llegar a efectuar la recuperación de estos elementos son amplios y costosos de implementar, por lo que sería mejor añadir una línea de este proceso a una empresa que ya cuente con un sistema de recolección de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos. Teniendo en cuenta la localización de las tierras raras a recuperar, sería mejor que esto se efectuara en el departamento de Cundinamarca (ya que tiene el 85% del potencial de recuperación). Las empresas que hacen recolección de estos productos en Bogotá y que pueden considerar invertir en este proyecto son: Gaia Vitare, Lito Ltda., Lasea Soluciones, Belmont Trading, y Computadores Para Educar.

Se considera que este proyecto es la primera fase de una profunda investigación a realizar en este campo, de acuerdo a los resultados de este documento se pueden tener en cuenta varios proyectos. En primer lugar se recomienda analizar el potencial de este negocio teniendo en cuenta otros aspectos como la parte financiera, legal y el desarrollo de la planta o la línea de recuperación, incluyendo aspectos como el transporte y almacenamiento. Por otro lado, también se puede hacer un análisis profundo del impacto ambiental que puede tener el método de la hidrometalurgia para imanes permanentes, pues éste hace uso de una gran cantidad de químicos y genera un alto nivel de aguas residuales, esto último se puede comparar con los efectos ambientales que tiene la disposición de residuos de estos productos y los efectos ambientales de la explotación de las tierras raras. Así mismo se recomienda estudiar más detalladamente el proceso de recuperación, el grado de pureza de los

materiales a obtener, las necesidades energéticas (que como se había mencionado, son bastante altas) y la forma de suplirlas.

A lo largo del proyecto se encontraron varios aspectos que pueden afectar los resultados del mismo. En primer lugar las fuentes utilizadas para obtener las bases de datos de importaciones fueron aquellas a las cuales se podría acceder por medio de la Universidad Icesi, en ellas dos tipos de los productos analizadas (baterías de NiMH y productos con tecnología LED) no cuentan con datos anteriores al año 2012, lo cual no permitió establecer una tendencia de demanda para los mismos. Así mismo, en el caso de las baterías de NiMH los datos encontrados podían pertenecer a productos muy diferentes (como carros, computadores portátiles y celulares), lo cual afecta directamente el resultado de la cuantificación del potencial de recuperación; sin embargo la información encontrada no permite determinar dicho producto, por lo que se emplearon cuatro escenarios para poder hacer dicha cuantificación, lo que puede generar sesgos en los resultados. Por todo lo anterior, se recomienda, en la medida de lo posible, hacer uso de otras fuentes de información que permitan generar dichos datos.

Finalmente, no se pudo determinar específicamente que elementos pueden ser sustitutos de las tierras raras, pues esto varía con las propiedades requeridas y el producto, lo cual a su vez está sujeto a una investigación y rediseño del último. En este punto se encontró información de los campos en los que se ha realizado y los casos que pueden presentarse en el futuro.

## BIBLIOGRAFÍA

Alomía H., Escallón, V., Ortegón K. (2007). Guía Metodológica para la realización de proyectos de grado. Departamento de Ingeniería Industrial. Universidad ICESI.

Alonso, E., Sherman, A.M., Wallington, T.J., Everson, M.P., Field, F.R., Roth, R., Kirchain, R.E., 2012. Evaluating rare earth element availability: a case with revolutionary demand from clean technologies. *Environ. Sci. Technol.* 46, 3406e3414.

American Elements. (2015). *AMERICAN ELEMENTS® / The Materials Science Company*. Retrieved 28 April 2015, from <http://www.americanelements.com/>

Arambulo, O. (2013). Ensayo de la Obsolescencia Programada. Retrieved from <http://es.scribd.com/doc/99146646/Ensayo-La-Obsolescencia-Programada#scribd>

Balli Morales, B. (n.d.). La Logística Reversa o Inversa, Aporte al Control de Devoluciones y Residuos en la Gestión de la Cadena de Abastecimiento. Retrieved from

<http://www.legiscomex.com/BancoMedios/Archivos/la%20logistica%20reversa%20o%20inversa%20basilio%20balli.pdf>

Banco Interamericano de Desarrollo – BID

Disponible en internet en <http://www.iadb.org/int/rtc/ecourses/esp/>

Barreca, S. (2000). Technology Life-Cycles And Technological Obsolescence. BCRI Inc.. Retrieved from <http://www.bcri.com/Downloads/Valuation%20Paper.PDF>

Binnemans, K., Jones, P. T., Blanpain, B., Gerven, T. V., Yang, Y., Walton, A., & Buchert, M. (2013). Recycling of rare earths: A critical review. *Journal of Cleaner Production*, 51, 1-22. doi: 10.1016/j.jclepro.2012.12.037

Buchert, M., Dittrich, S., Manhart, A., Merz, C., Schüler D., (2011). Application of rare earths in consumer electronics and challenges for recycling, September, 2011. Öko-Institut e.V. <http://www.oeko.de/en/publications/>

Buchert, M., Manhart, A., Bleher D., Pingel, D., (2012). Study on Rare Earths and Their Recycling, Final Report for The Greens/EFA Group in the European Parliament, Darmstadt, January, 2011. Öko-Institut e.V. <http://www.oeko.de/en/publications/>

Buchert, M., Schüler D., Bleher D., (2009). Sustainable Innovation and Technology Transfer Industrial Sector Studies: Critical Metals for Future Sustainable Technologies

and their Recycling Potential, July, 2009. Öko-Institut e.V.  
<http://www.oeko.de/en/publications/>

Caffarey, M. (2012). Umicore Precious Metals Refining. A key partner in closing the life cycle of EEE (Electrical and Electronic Equipment). Presentation, SERDC.

Carvajal, L. (1998). Metodología de la Investigación. 15ta edición.

Castor, S., & Hedrick, J. (2009). Rare Earth Elements. In J. Kogel, Industrial Minerals & Rocks (1st ed., pp. 769-792). Littleton, Colo.: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration. Retrieved from [http://www.sgtk.ch/rkuendig/dokumente/HS11\\_Rare\\_Earth\\_Elements.pdf](http://www.sgtk.ch/rkuendig/dokumente/HS11_Rare_Earth_Elements.pdf)

Decreto N° 1076 (2015). Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible.

US Environmental Protection Agency. (2005). *El ciclo de vida de un teléfono celular*. Retrived 10 July 2015, from <http://www.epa.gov/wastes/education/pdfs/sp-cell.pdf>

ELSEVIER. (2015). *A Look Inside Rare Earths | Elsevier*. Retrieved 28 April 2015, from <http://www.elsevier.com/online-tools/corporate/industry-insights/high-tech/a-look-inside-rare-earths>

ERAMET. (2015a). Key dates in ERAMET's history | ERAMET. Retrieved 24 March 2015, from <http://www.eramet.com/en/about/our-group/our-history>

ERAMET. (2015b). Maboumine - Gabon | ERAMET. Retrieved 16 April 2015, from <http://www.eramet.com/en/projects/maboumine-gabon>

ERAMET. (2015c). Our activities | ERAMET. Retrieved 24 March 2015, from <http://www.eramet.com/en/our-activities/extracting-generating-value/other-metals/our-activity>

ERAMET. (2015d). Our site locations | ERAMET. Retrieved 24 March 2015, from <http://www.eramet.com/en/locations>

ERAMET. (2015e). Our subsidiaries' recycling activities | ERAMET. Retrieved 24 March 2015, from <http://www.eramet.com/en/our-activities/recycling-reusing/our-subsidiaries-recycling-activities>

ERAMET. (2015f). Recycling, a secondary mine | ERAMET. Retrieved 24 March 2015, from <http://www.eramet.com/en/our-activities/recycling-reusing/recycling-secondary-mine>

European Commission. (2014). *Defining 'critical' raw materials - Raw materials - Enterprise and Industry*. Retrieved 28 April 2015, from [http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/critical/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/critical/index_en.htm)

Raee.org.co, (2014). *Gestores Colombia | raee.org.co*. Retrieved 4 September 2015, from <http://raee.org.co/raee-en-colombia/gestores-de-reciclaje/gestores-colombia/>

Gironza, C. (2014). Pronósticos. Apuntes de clase de Planeación y Control de la Producción, Colombia.

Goonan, T.G. (2011). Rare earth elements—End use and recyclability: U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2011-5094, 15 p. available only at <http://pubs.usgs.gov/sir/2011/5094/>.

Guarde, D., von Heeren, C., Sanchez, J.C., Arnaiz, S., Iribarnegaray, D., Castillo, B. (2010). Improved Management and Recycling of Waste Fluorescent Lamps. The Prolux Project; Care Innovation 2010, Vienna, Austria, 08.-11. November 2010.

Hagelüken, C. (2007). Metals Recovery from e-scrap in a global environment. Technical capabilities, challenges & experience gained. Presentación, 6th session of OEWG Basel Convention - Geneva.

Heizer, J. H., & Render, B. (2004). Principles of operations management. Upper Saddle River, NJ: Pearson/Prentice Hall.

Hernández, R., Fernández, C., Baptista, P. (2014). *Metodología de la Investigación*. Mc Graw Hill. 6ta edición.

Instituto colombiano de normas técnicas (2008). NORMA TECNICA COLOMBIANA NTC 1486, Documentación. Presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación.

Japan Metals & Chemicals Co., Ltd. (2015). General Information | 日本重化学工業株式会社 . Retrieved 25 March 2015, from [http://www.jmc.co.jp/en/company/general\\_information.html](http://www.jmc.co.jp/en/company/general_information.html)

Japan Metals & Chemicals Co., Ltd. (2015b). History | 日本重化学工業株式会社. Retrieved 25 March 2015, from <http://www.jmc.co.jp/en/company/history.html>

Japan Metals & Chemicals Co., Ltd. (2015c). Products | 日本重化学工業株式会社. Retrieved 25 March 2015, from <http://www.jmc.co.jp/en/products.html>

Jha, A. R. (2014). *Rare Earth Materials Properties and Applications*. Boca Raton: CRC Press.

Kara H., A. Chapman, T. Crichton, P. Willis, N. Morley, 2010. Lanthanide Resources and Alternatives, A report for Department for Transport and Department for Business, Innovation and Skills, 26 May 2010, Oakdene Hollins Research & Consulting.

Ley N° 1672 (2003). Por la cual se establecen los lineamientos para la adopción de una política pública de gestión integral de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE), y se dictan otras disposiciones.

Lyman, J.W., Palmer, G.R., (1995). Hydrometallurgical treatment of nickel-metal hydride battery electrodes. In: Third International Symposium on Recycling of Metals and Engineered (USA), pp. 131e144.

Lyman, J.W., Palmer, G.R., 1992. Scrap Treatment Method for Rare Earth Transition Metal Alloys. US Patent 5,129,945.

Mei G., Xie K., Li G., (2007). Progress in study on spent fluorescent lamps' harmless disposal and resource utilization, College of Resources and Environmental engineering, Wuhan University of Technology, China.

Monroy, N., & Ahumada, M. (2006). Logística Reversa: "Retos para la Ingeniería Industrial". Revista De Ingeniería, 23, 23-33. Retrieved from <https://revistaing.uniandes.edu.co/pdf/Rv23-3.pdf>

OSRAM. (2009). Method for recovery of rare earths from fluorescent lamps. United States Patent Application Publication. Inventors: Otto, R.; Wojtalewicz-Kasprzak, A. Assignee: OSRAM GmbH, title: Pub. No. US 2009/0162267 A1.

Panayotova, M., Panayotov, V., (2012). Review of methods for the rare earth metals recycling, University of Mining and Geology. Annual of the university of mining and geology "St. Ivan Rilski", Vol. 55, Part ii, Mining and Mineral processing, 2012.

Pehlken, A., Zimmermann, T., (2012). Material Life Cycles in Wind Energy Plants. Proceedings of the International Conference on Mechanical Engineering and Mechatronics Ottawa, Ontario, Canada, 15-17 August 2012.

Pilas. Retrieved July 10, 2015, from <http://www.criscyt.edu.ar/enciclopedia/terminos/pilas.htm>



Pilas Colombia, (n.d.). *Pilas con el Ambiente el programa posconsumo de la ANDI que recolecta pilas usadas para su correcta disposición final*. Retrieved 27 August 2015, from [http://www.pilascolombia.com/el\\_programa](http://www.pilascolombia.com/el_programa)

Rare Earth Technology Alliance. (n.d.). What Are Rare Earths?. Retrieved 24 March 2015, from <http://www.rareearthtechalliance.com/What-are-Rare-Earths>

Rabah, M. 2008. Recyclables recovery of europium and yttrium metals and some salts from spent fluorescent lamps, *Waste management*, 28, 318-325.

Resende, L., C. Morais, 2010. Study of the recovery of rare earth elements from computer monitor scraps – leaching experiments, *Minerals Engineering*, 23, 277-280.

Rodrigues, R. (2011). International Seminar on Electronic Waste. Presentación, UMICORE Brasil.

Roland, S. (2011). *La idea que quemó la lamparita. Acerca de la obsolescencia planificada*. Retrieved from <http://www.fisica.edu.uy/~sroland/media/obsolescencia-programada-cursoUCS.pdf>

Schüler D., Buchert, M., Liu, R., Dittrich, S., Merz, C., (2011). Study on Rare Earths and Their Recycling, Final Report for The Greens/EFA Group in the European Parliament, Darmstadt, January, 2011. Öko-Institut e.V. <http://www.oeko.de/en/publications/>

Searles, C., & Schiemann, M. (2014). Understanding and Differentiating Design Life, Service Life, Warranty and Accelerated Life Testing for Lead Acid Batteries. Retrieved from <http://www.battcon.com/PapersFinal2014/8%20Searles%20Paper%202014%20Final.pdf>

Solvay. (2014). Loop Life Project | Solvay. Retrieved 18 April 2015, from <http://www.solvay.com/en/innovation/european-life-projects/loop-life-project-objectives.html>

Solvay. (2013a). Our company | Solvay. Retrieved 24 March 2015, from <http://www.solvay.com/en/about-solvay/our-company/index.html>

Solvay. (2013b). Solvay España | Solvay. Retrieved 24 March 2015, from <http://www.solvay.es/es/index.html>

Solvay. (2012c). Solvay launches its rare earth recycling activity in France | Solvay. Retrieved 24 March 2015, from [http://www.solvay.com/en/media/press\\_releases/20120927-coleopterre.html](http://www.solvay.com/en/media/press_releases/20120927-coleopterre.html)

Solvay. (2013d). Strategy | Solvay. Retrieved 24 March 2015, from <http://www.solvay.com/en/about-solvay/strategy/index.html>

Stricker, N. (2013). Reverse mining: Scientists extract rare earth materials from consumer products. Retrieved from [https://inlportal.inl.gov/portal/server.pt/community/newsroom/257/feature\\_story\\_details/1269?featurestory=DA\\_606590](https://inlportal.inl.gov/portal/server.pt/community/newsroom/257/feature_story_details/1269?featurestory=DA_606590)

Tang J., Wei C., Zhao D., Lin H., Tian G., (2009). Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Recovery from Sintered NdFeB scrap, *Journal of Rare Metals and Cemented Carbides*, 2009-01, abstract viewed 26 August 2015, < [http://en.cnki.com.cn/Article\\_en/CJFDTOTAL-XYJY200901004.htm](http://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTOTAL-XYJY200901004.htm) >

Tsamis, A., Coyne, M., (2014). Recovery of Rare Earths from Electronic wastes: An opportunity for High-Tech SMEs. Directorate general for internal policies. Policy department A: Economic and Scientific Policy. Available at: <http://www.europarl.europa.eu/studies>

Williams, J. (n.d.) *The Average Lifespan for Laptops*. Retrieved July 10, 2015, from <http://smallbusiness.chron.com/average-lifespan-laptops-71292.html>

UNEP (2013) Metal Recycling: Opportunities, Limits, Infrastructure, A Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel. Reuter, M. A.; Hudson, C.; van Schaik, A.; Heiskanen, K.; Meskers, C.; Hagelüken, C.

Universidad Nacional de Colombia, A. (2013). *Reciclarán pilas para beneficio agroindustrial*. *Agencia de Noticias - Universidad Nacional de Colombia*. Retrieved 27 August 2015, from <http://www.agenciadenoticias.unal.edu.co/nc/ndetalle/cat/video/pag/6/article/reciclaran-pilas-para-beneficio-agroindustrial.html>

*Video Institucional LITO S.A.* (2012). LITO.

What Are Rare Earths? (n.d.). Retrieved March 23, 2015, from <http://www.rareearthtechalliance.com/What-are-Rare-Earths>

Wojtalewicz-Kasprzak, A., 2007. Erzeugung von synthetischen Selten-Erd-Konzentraten aus Leuchtstoffabfällen. Dissertation an der TU Clausthal.

Zhang X., D. Yu, L. Guo, 2010. Test Study New Process on Recovering Rare Earth by Electrical Reduction – P507 Extraction Separation Method, Journal of Copper Engineering, 1, 1009-3842()0066-04.

## **ANEXOS**

### **Anexo 1. Archivos complementarios**

Para el desarrollo de este proyecto se trabajó en dos archivos de Excel que se entregarán junto a este trabajo, en uno de ellos se encuentra todo lo relacionado con el manejo de los datos de las partidas arancelarias y los pronósticos desarrollados, mientras que en el otro se encuentra toda la información relacionada con la caracterización de las tierras raras, las alternativas de recuperación y la cuantificación del potencial de recuperación.