

GESTIÓN TECNOLÓGICA PARA EL APROVECHAMIENTO DE LOS RESIDUOS DE
PILAS DE ZINC Y MANGANESO COMO ADITIVO EN LA INDUSTRIA ASFÁLTICA

ANDRÉS FELIPE JARAMILLO SIERRA

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERIAS
PROGRAMA DE MAESTRÍA EN GESTIÓN TECNOLÓGICA
MEDELLÍN
2020

GESTIÓN TECNOLÓGICA PARA EL APROVECHAMIENTO DE LOS RESIDUOS DE
PILAS DE ZINC Y MANGANESO COMO ADITIVO EN LA INDUSTRIA ASFÁLTICA

ANDRÉS FELIPE JARAMILLO SIERRA

Trabajo de grado para optar al título de MSc en Gestión Tecnológica

Director:

Diego José Cuartas Ramírez

MSc. en Gestión Tecnológica

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERIAS
PROGRAMA DE MAESTRÍA EN GESTIÓN TECNOLÓGICA
MEDELLÍN
2020

Medellín, 06 de agosto de 2020

Andrés Felipe Jaramillo Sierra

“Declaro que este trabajo de grado no ha sido presentado con anterioridad para optar a un título, ya sea en igual forma o con variaciones, en ésta o en cualquiera otra universidad”. Art. 92, parágrafo, Régimen Estudiantil de Formación Avanzada.

Firma del autor (es)



DEDICATORIA

A la memoria de mi madre

MARIA LIGIA LUZ SIERRA SIERRA

AGRADECIMIENTOS

“Principalmente agradezco a DIOS, porqué ha hecho posible cada uno de los logros y éxitos en mi vida profesional y cotidiana, y porque hoy, me permite hacer entrega de los resultados presentes en este proyecto, aportando mi granito de arena al mundo, a la ciencia, a las empresas, y finalmente a mi amado departamento de Antioquia”.

En segundo lugar, un inconmensurable agradecimiento a mis padres Héctor Jaramillo Cárdenas y María Ligia Luz Sierra Sierra (q.e.p.d.), quienes me inculcaron el amor al estudio, me enseñaron los valores, la ética, y la perseverancia necesaria para alcanzar los objetivos y metas que me he propuesto, también por haberme dado la vida, y los pilares para trasegar por ella. En tercer lugar, al resto de mi familia, especialmente a mis tías; María Beatriz, Margarita María, Lía María, y María Eugenia Sierra Sierra, quienes me han apoyado todo el tiempo desde el inicio de este proyecto. A mis ancestros; resaltando a mis tíos-abuelos, Manuel José Sierra Ríos (q.e.p.d), rector fundador de la Universidad Pontificia Bolivariana y Darío Sierra Londoño (q.e.p.d), miembro honorario de la Academia de Medicina de Medellín, a mi abuelo Joaquín Emilio Sierra Ríos (q.e.p.d), honorable Representante a la Cámara y a mi abuela Ligia Sierra de Sierra; todos ellos, han dejado grandes huellas, inspirándome a apostarle a metas grandes, con el fiel, noble y obligante objetivo de cumplirlas.

Agradezco también a mi primo Ricardo Sierra Moreno, destacado empresario antioqueño, quien ha sido para mí una fuente de inspiración, que ha contribuido contundentemente a mi progreso profesional y académico.

A todos los profesores que me han inculcado amor por la ciencia, a Beatriz Ángel, Dora Elena Ángel, y muy especialmente a Rubén Darío Álvarez García, quien me dejó clara la meta, de cambiar el mundo para bien desde la academia y me incitó con ímpetu a subir este peldaño más en mi vida.

Al director del presente trabajo de grado, Diego José Cuartas Ramírez, por su paciencia, acompañamiento y entrega como guía en el paso a paso.

A todo el equipo del Centro de Innovación y Negocios en Biotecnología BIOINTROPIC y a los coautores, Federico Vásquez Jiménez (Director de Innovación en Tronex S.A.S,) a Guillian Agudelo Buitrago (Coordinadora de investigación y Desarrollo en Conasfaltos S.A.) y a Sandra Milena Restrepo Arcila aspirante a PhD, en la Universidad Nacional de Colombia-Medellín.

A mis amigos y hermanos, Víctor Ortiz, John Jairo Carvajal, Andrés Álzate, Daniel Ramírez, Camilo Marín, Juan Guillermo Berrío, Víctor Betancur, y Román Vélez, les agradezco siempre, por estar.

Dios les pague a todos por haberlo hecho posible


ANDRÉS FELIPE JARAMILLO SIERRA

CONTENIDO

| | |
|--|----|
| RESUMEN | 10 |
| INTRODUCCIÓN | 11 |
| 1. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE..... | 12 |
| 2. CASO DE ESTUDIO..... | 18 |
| 3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA..... | 19 |
| 3.1. Pregunta de investigación..... | 19 |
| 3.2. Hipótesis..... | 19 |
| 3.3. Alcance..... | 20 |
| 3.4. Objetivo General..... | 20 |
| 3.5. Objetivos Específicos | 20 |
| 4. METODOLOGÍA..... | 21 |
| 4.1. Tipo de investigación..... | 21 |
| 4.2. DATOS: Descripción y fuentes | 21 |
| 4.3. DATOS: Métodos para obtenerlos..... | 21 |
| 4.4. SISTEMATIZACIÓN, PROCESAMIENTO, ANÁLISIS, DISEÑO o SÍNTESIS: Métodos para realizarlos..... | 21 |
| 4.5. RESULTADOS: Métodos de comunicación..... | 22 |
| 4.6. Plan de ensayos | 22 |
| 4.6.1. Caracterización de MN | 22 |
| 4.6.2. Variables respuesta | 24 |
| 4.6.3. Procedimiento..... | 24 |
| 4.6.3.1. Paso I..... | 24 |
| 4.6.3.2. Paso II..... | 24 |
| 4.6.3.3. Paso III..... | 25 |
| 4.6.3.4. Paso IV | 25 |
| 4.6.3.5. Paso V | 26 |
| 4.6.3.6. Paso VI | 26 |
| 5. RESULTADOS | 28 |

| | |
|---|----|
| 4.2. Análisis de resultados | 38 |
| 6. DISCUSIÓN..... | 39 |
| 7. CONCLUSIONES | 40 |
| BIBLIOGRAFÍA | 41 |
| ANEXOS | 46 |
| Anexo 1. Cronograma | 46 |
| Anexo 2. Presupuesto..... | 46 |
| Anexo 3. Concepto ético | 48 |
| Anexo 4. Líneas de Investigación del proyecto | 48 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Asfalto a 165°C con adición de masa negra. | 24 |
| Figura 2. RPM 0,73, Torque 95,4%..... | 25 |
| Figura 3. Muestra en molde definido por la norma INV E-706 | 25 |
| Figura 4. Molde con muestra en baño Thanson | 26 |
| Figura 5. Molde con muestra en penetrómetro | 26 |
| Figura 6. Resultados de viscosidad MN sin tratamiento previo | 29 |
| Figura 7. Resultados de penetración MN sin tratamiento previo | 29 |
| Figura 8. Resultados de penetración, MN Tamizada Malla 200..... | 30 |
| Figura 9. Resultados de penetración MN tamizada malla 200 | 30 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Caracterización del residuo (Masa Negra)-Tronex 2018 | 14 |
| Tabla 2. Caracterización química de Masa Negra-por Biointropic, 2019..... | 14 |
| Tabla 3. Caracterización fisicoquímica de Masa negra por Biointropic, 2019..... | 15 |
| Tabla 4. Algunas de las aplicaciones identificadas por Gen-Triz para el uso de la MN15 | |
| Tabla 5. Resultados del análisis FRX y las pérdidas por ignición, contenido en porcentaje. | 22 |
| Tabla 6. Parámetros y protocolos internos de la empresa para asfaltos (MN sin ningún proceso previo). | 23 |
| Tabla 7. Parámetros y protocolos internos de la empresa asfaltos (MN pasante malla No 200) | 23 |
| Tabla 8. Resultados de los experimentos con MN en asfaltos | 28 |
| Tabla 9. Resultados ensayo Asfalto PEN 60/70 | 31 |
| Tabla 10. Resultados ensayo Asfalto PEN 60/70+ MN 1% | 33 |
| Tabla 11. Resultados ensayo Asfalto PEN 60/70+ MN 3% | 36 |

GLOSARIO

RECOPILA: Recopila es un programa para recoger las pilas usadas, llevarlas a un lugar seguro y evitar que se arrojen a la basura; contando con la participación activa del consumidor y en beneficio del medio ambiente (Es un programa de TRONEX SAS, bajo su sombrilla de Responsabilidad Empresarial y Ambiental)

MASA NEGRA: Es el nombre asignado comúnmente en el ámbito empresarial a los residuos que dejan las pilas usadas después de pasar por un proceso de separación de materiales

PILAS PRIMARIAS: Cuya carga no puede renovarse cuando se agota, excepto reponiendo las sustancias químicas de que está compuesta

PILAS ALCALINAS: Las pilas alcalinas son unas de las baterías más populares del mercado. Son las más comunes por su gran versatilidad, adaptándose a todo tipo de tamaños. Además, se distinguen de otro tipo de opciones tradicionales porque, aunque tienen el mismo voltaje (capacidad de generar energía para que funcionen los aparatos) y tamaño que estas, duran de 4 a 9 veces más.

ASFALTO: Es la mezcla de brea, que es un material viscoso, pegajoso y de color plomo (gris oscuro) con arena o gravilla, para pavimentar caminos y como revestimiento impermeabilizante de muros y tejados.

VISCOSIDAD: La viscosidad de un fluido es una medida de su resistencia a las deformaciones graduales producidas por tensiones cortantes o tensiones de tracción.

ECONOMÍA CIRCULAR: La economía circular es una estrategia que tiene por objetivo reducir tanto la entrada de los materiales vírgenes como la producción de desechos, cerrando los «bucles» o flujos económicos y ecológicos de los recursos.

RESUMEN

La Masa Negra (MN), es el nombre asignado comúnmente en el ámbito empresarial a los residuos que dejan las pilas usadas después de pasar por un proceso de separación de materiales; en Colombia, el tratamiento dado a la MN, se concentra en el pago por la disposición de dicho residuo, dejando a un lado el aprovechamiento de los elementos que lo caracterizan. Tronex S.A.S. único fabricante de pilas en Colombia; busca acercarse a lo llamado economía circular, realizando un proceso de investigación, desarrollo e innovación (ROBLEDO V., 2017), para crear un producto a partir de la MN de las pilas.

La masa negra es un residuo de las pilas usadas del sistema químico Zn/Mn que contiene elementos de interés en diferentes industrias; el presente proyecto tuvo como objetivo divulgar los resultados del proceso de investigación, desarrollo e innovación para convertir dicho residuo en un insumo para la industria asfáltica.

PALABRAS CLAVE: pilas primarias; pilas alcalinas; asfalto; viscosidad; residuo pilas y baterías; aprovechamiento de residuos; economía circular.

INTRODUCCIÓN

La Masa Negra, en adelante MN, es el nombre asignado comúnmente en el ámbito empresarial a los residuos que dejan las pilas usadas después de pasar por un proceso de separación de materiales. En Colombia, el tratamiento dado a la MN luego de su recuperación mediante los programas de recolección de pilas usadas como RECOPILA¹ se reduce al pago por la disposición de dicho residuo en otro país, dejando a un lado el aprovechamiento de los elementos que lo caracterizan o de darle valor agregado al “residuo”.

Dado lo anterior, Tronex S.A.S. referente en el mercado de pilas y baterías con la marca de pilas Tronex y único fabricante de pilas en Colombia; acercándose a la llamada economía circular (La economía circular consiste en mantener los recursos en uso durante el mayor periodo posible, sacar su máximo valor mientras se están usando y aprovechar los residuos que genere al final de su vida útil (Hidalgo G, 2017)), realizó un proceso de investigación, desarrollo e innovación, con el objetivo de crear un producto a partir de la MN de las pilas y baterías, aprovechar el residual de su proceso y dar cumplimiento a la regulación nacional establecido en las leyes 253 de 1996, 1252 de 2008 y 1672 de 2013. (El Congreso de Colombia, 2008), (El Congreso de Colombia, 2013) e internacional (El Congreso de Colombia, 1996) para los fabricantes de acumuladores eléctricos. El proceso de I+D+i implementado en este trabajo, contempló en una primera fase de vigilancia tecnológica, la identificación, de diversas alternativas industriales de uso del residuo, y la clasificación de las mismas en tres categorías: una primera categoría en la que se usa la MN íntegra o en bruto, una segunda categoría en la que se usan los componentes de carbón de la misma y una tercera categoría en la que se aprovechan los óxidos de metales. Posteriormente en una segunda fase, se realizó una priorización estratégica, con criterios como el costo de operación, inversiones requeridas, y potencial de mercado, permitiendo definir las aplicaciones, más atractivas (Biointropic, 2019). Como resultado de esta etapa, se descartaron las opciones de derivados y se determinó enfocar la investigación en el uso de la MN íntegra en fertilizantes, asfaltos, y como pigmento en ladrillos, concreto, y cerámica.

Finalmente, se efectuaron pruebas y ensayos en las industrias priorizadas, obteniendo deducciones significativas. El presente artículo detalla el proceso y los resultados encontrados al experimentar, validar y llevar al mercado el residual del tratamiento de pilas usadas, como un insumo y nuevo producto, en la preparación de asfaltos y mezclas de agregados siguiendo la normatividad existente a nivel nacional e internacional (Instituto Nacional de Vías (INVIAS), 2012).

¹Programa de Tronex S.A.S., para recoger las pilas usadas, llevarlas a un lugar seguro y evitar que se arrojen a la basura; contando con la participación activa del consumidor y en beneficio del medio ambiente (Recopila, 2019).

1. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

La transición de un modelo económico lineal tradicional a una economía circular está motivada e impulsada por el objetivo de mejorar la eficiencia de los recursos (P. Ghisellini, 2016). Incluso hace mucho tiempo se han planteado ideas de que todos los residuos originados de los procesos productivos puedan convertirse en insumos y reutilizarse como parte de un ciclo que garantice eficiencia en el uso de los recursos limitados que tiene el ser humano. Por ejemplo, en 1966, Kenneth Boulding había utilizado la metáfora de la nave espacial para describir un sistema cerrado en el que todos los productos del consumo se convertirían constantemente en insumos para la producción (Boulding, 1966). Así mismo (Georgescu-Roegen, 1971) también había discutido sobre los límites de los recursos naturales en 1971 y lo volvió a hacer en 1986 en retrospectiva.

Estas primeras ideas no solo han sido fundamentales para el desarrollo de la economía ecológica y para la economía circular como concepto; sino que también han promovido el desarrollo de muchos otros términos y conceptos, incluida la hoy llamada ecología industrial. (Levanen Jarkko, 2018).

La capacidad de las empresas para adaptarse a los cambios institucionales adquiere una importancia crítica en el contexto de economía circular porque los países suelen avanzar en esa área modificando sus marcos institucionales. Sin embargo, es importante tener en cuenta que ningún entorno institucional es un juego óptimo para todos los jugadores. Más bien, la estructura institucional es siempre imperfecta y, por lo tanto, las empresas deben ajustar constantemente sus actividades de modelo de negocio para adaptarse a las expectativas actuales de entorno institucional. (Levanen Jarkko, 2018, pág. 374)

Así mismo, una tendencia generalista en el marco de la gestión tecnológica, indica desde lo ambiental, que la adopción de un enfoque de gestión tecnológica sostenible de la cadena de suministro se está convirtiendo rápidamente en un desafío y oportunidad comercial clave en China y otras grandes economías emergentes de todo el mundo, donde nuestros mayores desafíos de gestión ambiental residen actualmente y continuarán existiendo durante muchos años (J. Park, 2010, pág. 1494).

Partiendo de lo anterior, la investigación y el desarrollo experimental (I+D), comprenden el trabajo creativo llevado a cabo de forma sistemática para incrementar el volumen de conocimientos, incluido el conocimiento del hombre, la cultura y la sociedad, y el uso de esos conocimientos para crear nuevas aplicaciones (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico -OCDE, 2002, pág. 30). Siendo así, y en el marco de los intereses mundiales, asociados a los objetivos de desarrollo sostenible planteados por la Organización de las Naciones Unidas (ONU), las empresas como Tronex S.A.S. buscan valorizar sus residuos, no solo pretendiendo

encontrar nuevas fuentes de ingresos mediante lo hoy llamado economía circular² (Hidalgo G, 2017), sino también, sumar al alcance de algunos de ellos.

La presente investigación se enfocó en el alcance específico de los Objetivos de Desarrollo Sostenible número N°9: Industria, innovación e infraestructura, N°12: Producción y consumo responsable, y N°17: Alianza para lograr los objetivos (Organización de las Naciones Unidas -ONU-, 2019). Frente al N°9, dado que se estaba relacionando un residuo de un proceso industrial, buscando convertirlo en insumo con mercado y precio (Innovación). Frente al N°12, dado que se procuraba convertir el proceso productivo en un sistema con mínimo nivel residual. Y finalmente, frente al objetivo N°17, dadas las alianzas interindustriales necesarias para materializase. Un aspecto importante, es aclarar que los términos pilas y baterías se diferencian significativamente como lo indica el diccionario de energía eléctrica de la Universidad de Salamanca España: Una pila eléctrica es un elemento destinado a suministrar energía eléctrica a partir de energía química. Una batería eléctrica también suministra energía eléctrica a partir de energía química, pero se reserva el nombre de batería para los elementos que pueden volver a recuperar energía química a partir de energía eléctrica que absorben. Es decir, las baterías son recargables y, en general, suelen ser de mayor tamaño que las pilas. No obstante, a veces se llaman pilas recargables a pequeñas baterías que tienen la forma habitual de las pilas (F. R. Quintela y R. C. Redondo Melchor, 2020).

Para Tronex S.A.S., la producción y comercialización de pilas y baterías como parte de sus negocios base, ha promovido también el surgimiento de programas ambientales exitosos y reconocidos como Recopila (Recopila, 2019). No obstante, si bien la recuperación de las baterías desgastadas como programa de reciclaje es significativo y de gran impacto ambiental para el país, aún queda mucho por hacer.

Según prueba por ejemplo Phuong en un estudio sobre los sistemas de reciclaje de pilas y baterías portátiles de Zinc y Manganeso, donde indica que aunque el sistema de gestión de baterías alcalinas / ZnC no reduce el consumo de todos los recursos, especialmente los combustibles fósiles y la tierra, este es beneficioso en términos de ahorro de minerales y metales (Ha Phuong Tran, 2018, pág. 265), son aún muchas las inquietudes que existen para decidir qué hacer con dichas baterías recuperadas.

Por esta razón, mediante el presente artículo de investigación de I+D+i se buscaba identificar el potencial del mercado de los productos desarrollados a partir de los residuos generados de las pilas y baterías Tronex, viabilizando también un nuevo negocio para estos residuos de interés y no solo llegando hasta la fase de reciclaje como tal.

Como punto de partida y referencia, Tronex SAS, realizó estudios previos a la masa

²El término "economía circular" fue utilizado por primera vez por David W. Pearce y R. Kerry Turner en su libro ahora clásico Economía de los recursos naturales y el medio ambiente (D.W. Pearce, 1990)

negra de las pilas usadas y recolectadas por el programa Recopila, donde determinó que las mismas tienen altos contenidos de Zinc y Manganeseo, que pueden ser aprovechados para la elaboración de otro tipo de insumos incluyendo los aditivos asfálticos. La caracterización de la masa negra en bruto realizada por Tronex en el año 2018, en un proyecto previo realizado con la Universidad de Antioquia, (Universidad de Antioquia & Tronex S.A.S, 2018), señaló por ejemplo que la masa negra de las pilas contiene altas cantidades de Zinc y Manganeseo, entre otros componentes como se observa en la siguiente tabla:

Tabla 1. Caracterización del residuo (Masa Negra)-Tronex 2018

| Porcentaje de los elementos obtenidos por FRX | |
|---|--------|
| Zn | 20,18% |
| K | 1,99% |
| Cl | 1,50% |
| Mn | 35,31% |
| Al | 0,22% |
| Fe | 1,84% |
| C | --- |
| Si | 0,30% |
| L.O.I | 19,80% |

Fuente: (Universidad de Antioquia & Tronex S.A.S, 2018, pág. 4)

Así mismo, La Corporación Biointropic, en el estudio técnico del proyecto de valorización del potencial de mercado de productos desarrollados a partir de residuos (masa negra) de las pilas y baterías (Biointropic, 2019, pág. 15), realizó una caracterización física y química donde se evidencia la presencia en cantidades significativas de los dos elementos señalados (Zinc y Manganeseo).

Tabla 2. Caracterización química de Masa Negra-por Biointropic, 2019

| Nombre de la Muestra | Loss On 950°C | SiO2 | TiO2 | Al2O3 | Fe2O3 | Mn3O4 | MgO | CaO | Na2O | K2O | P2O5 | SO3 | BaO | NiO | CuO | ZnO |
|----------------------|---------------|------|-------|-------|-------|--------|------|------|-------|-------|-------|------|-------|-------|------|--------|
| Masa Negra | 21,6491 | 0,75 | 0,021 | 0,21 | 5,09 | 38,933 | 0,07 | 2,00 | 0,672 | 0,462 | 0,013 | 0,66 | 0,446 | 0,324 | 0,58 | 27,963 |

Fuente: (Biointropic, 2019, pág. 15)

Más adelante, luego de validar los análisis realizados de caracterización de la masa negra, Biointropic llevó a cabo otros análisis adicionales, de composición química en óxidos por la técnica de Fluorescencia de Rayos X (FRX), y las pérdidas por ignición, donde se corroboraron los altos contenidos del óxido de manganeso, óxido de zinc y algunas “impurezas” que acompañaron la muestra de MN, permitiendo inferir efectivamente un gran potencial de concentración de elementos con potencial de aplicación en varios sectores. (Biointropic, 2019, pág. 15).

La caracterización fisicoquímica realizada por (Biointropic, 2019, pág. 16), permitió también complementar lo anterior, con los otros aspectos sobre la masa negra:

- El agua potable tiene una conductividad de 5,5µS/cm.
- El Agua con un 0,1% de NaCl tiene una conductividad 2mS/cm.

Tabla 3. Caracterización fisicoquímica de Masa negra por Biointropic, 2019

| | |
|---------------------|-----|
| Ph | 9,6 |
| Conductividad Ms/Cm | 2,2 |

Fuente: (Biointropic, 2019, pág. 16)

En general, dichos estudios validaron el potencial de la Masa Negra de las pilas y sus componentes para el uso en otras industrias, complementado así lo realizado previamente por la compañía Gen Triz, en otro estudio previo realizado para Tronex. En este se habían identificado 40 potenciales alternativas de aprovechamiento del residuo, sin caracterizarlo. Alternativas sobre las que indispensablemente deberían realizarse las pruebas técnicas y de laboratorio necesarias para validarlas con criterio científico y de mercado. Nueve de estas para el uso del residuo en su totalidad, doce, extrayendo el carbono negro que contiene, y otras nueve para el uso de los óxidos de zinc y manganeso también inmersos *“Altogether, GEN TRIZ has identified 40 new applications for TRONEX Black Mass and its components: 9 applications were found for the Black Mass as a whole; 12 applications – for the carbon black part of the Black Mass, and 9 applications – for the “metal oxides” fraction”* (Gen-Triz & Tronex SAS, 2019, pág. 13).

Tabla 4. Algunas de las aplicaciones identificadas por Gen-Triz para el uso de la MN

Identified applications at a glance

| Areas of Application | Black Mass as a whole | Carbon components | Metal Oxides |
|----------------------|-----------------------|-------------------|--------------|
|----------------------|-----------------------|-------------------|--------------|

| | | | |
|------------------------------|-----------------------------------|--|-------------------------------------|
| Construction industry | 1.1. Colorant | 2.1.4. Colorant 2.1.7. Pigment /sunlight protector in plastics 2.1.9. Conductive additive (EMI shielding) 2.1.10. Conductive additive (heating) | 2.2.2. Colorant |
| Rubber industry | 1.2. Rubber filler | 2.1.2. Conductive filler in rubber goods 2.2.11. Filler in Tires | 2.2.7. Rubber Filler |
| Road construction | 1.3. Additive in asphalt concrete | 2.1.3. Additive in asphalt concrete 2.1.10. Conductive additive (heating) | 2.2.1. Additive in asphalt concrete |

Fuente: (Gen-Triz & Tronex SAS, 2019, pág. 16)

Al realizar el ejercicio de vigilancia tecnológica, se identificó el uso de algunos componentes de la Masa Negra como insumo en otras industrias (Estados Unidos Patente nº 20100090377, 2010), algunos con minerales de relleno para asfalto (Wasilewska, 2017) y otros con agregados finos en polvo (Meizhu Chen, 2011). Así mismo, se identificaron estudios donde el zinc y manganeso extraídos de la MN mediante procesos fisicoquímicos pueden ser usados como micronutrientes para la producción de cultivos (Alloway, 2008). Sin embargo, esto requería la extracción de los mismos mediante procesos adicionales, implicando así la construcción de una planta de extracción de metales, a diferencia del uso de la masa negra íntegra como insumo en la industria asfáltica. En otro estudio (Sangiorgi, y otros, 2017) se utilizaron diferentes materiales residuales para la producción de betún asfáltico, material usado para la manufactura de asfaltos, sin embargo, en ninguna de las pruebas se utilizó residual de pilas y baterías (MN). No obstante, un resultado significativo del estudio mencionado fue que “se sugiere que todos los rellenos probados pueden considerarse como alternativas válidas al relleno natural en mezclas bituminosas. Algunos resultados, sin embargo, no cumplen con el estándar de requisitos sugeridos para rellenos tradicionales” (Sangiorgi, y otros, 2017, pág. 10).

Mediante una adecuada gestión tecnológica, se identificó a través del ejercicio de vigilancia tecnológica, que el zinc y manganeso presentes en la masa negra podrían ser usados como micronutrientes para la producción de cultivos, sin embargo, algunos

estudios (Alloway, 2008, pág. 18) han demostrado que algunos materiales pueden contener cantidades significativas de oligoelementos no esenciales que deben minimizarse para evitar posible toxicidad de los cultivos o problemas de calidad a largo plazo, y siendo así, se decidió encaminar el estudio para el uso de la MN como aditivo asfáltico dado que, por lo anterior, se encontró mucho más atractivo y con mayor potencial. Así mismo, lo señalado por el estudio de Gen-Triz y los estudios realizados por Biointropic, invitaron a indagar aún más sobre la MN como aditivo en la industria asfáltica. Por lo tanto, para profundizar más en la investigación, fue necesario conversar con una de las empresas productoras de mezcla asfáltica más representativas en Colombia (Conasfaltos), con el fin de llevar a cabo pruebas determinísticas.

2. CASO DE ESTUDIO

La producción y comercialización de pilas y baterías como negocio base en compañías productoras de pilas como Tronex S.A.S. y comercializadoras, ha dado pie al surgimiento de programas exitosos y reconocidos como RECOPILA³, sin embargo, a pesar del gran impacto ambiental para el país que origina el programa, las pilas continúan siendo un residuo.

Algunas de las pilas y baterías desgastadas que se recuperan, traen consigo residuos con altos niveles de Zinc y Manganeso; elementos que se han identificado con potencial de aprovechamiento en la elaboración o desarrollo de otros productos. Hasta el momento no se ha revisado con detalle el mercado de este tipo de subproductos, y, por lo tanto, se desea ahondar y validar sobre los mismos buscando identificar potenciales negocios con lo que hoy son desechos peligrosos no solo para Tronex S.A.S. sino en todo Colombia.

En general, la intención del presente artículo de investigación fue demostrar que, mediante una adecuada gestión tecnológica, se puede convertir la masa negra de las pilas y baterías usadas en un insumo para la industria asfáltica. Llevando un residuo inútil y costoso a un producto novedoso con valor agregado para la industria de construcción de carreteras (innovación). Luego, difundir los resultados para generar avances posteriores y expansión global del procedimiento. Así, se suman esfuerzos para alcanzar lo que hoy es llamado economía circular en la industria de producción de baterías y pilas portátiles. Por otro lado, se da la posibilidad de que Tronex SAS obtenga nuevos ingresos y en el futuro, para otras compañías productoras y comercializadoras de pilas y baterías. Cabe destacar que esta investigación también contribuye a aumentar los impactos positivos a nivel ambiental para el país.

Con el fin de poder demostrar la usabilidad de la MN en la industria asfáltica, fue necesario realizar diferentes pruebas específicas con criterio científico y bajo las normatividades del mercado para determinar el comportamiento de la MN como insumo para la construcción de carreteras.

³Recopila es un programa para recoger las pilas usadas, llevarlas a un lugar seguro y evitar que se arrojen a la basura; contando con la participación activa del consumidor y en beneficio del medio ambiente.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La producción y comercialización de pilas y baterías como negocio base en compañías productoras de pilas como Tronex S.A.S. y comercializadoras, ha dado pie al surgimiento de programas exitosos y reconocidos como RECOPILA, sin embargo, a pesar del gran impacto ambiental para el país que origina el programa, aún las pilas son un residuo.

Dado lo anterior, se busca mediante el presente proyecto, identificar y validar si los residuos de las pilas usadas pueden ser usados como insumo en la industria asfáltica, pretendiendo viabilizar un potencial nuevo negocio para los mismos, permitiendo a su vez, aportar mayor valor al proceso de recuperación ya adelantado mediante el programa RECOPILA, y además aumentar los impactos positivos a nivel ambiental para el país.

Algunas de las pilas y baterías desgastadas que se recuperan, traen consigo residuos con altos niveles de Zinc y Manganeseo, (elementos que se han identificado con potencial de aprovechamiento en la elaboración o desarrollo de otros productos). Hasta el momento no se ha revisado con detalle el mercado de este tipo de subproductos, y por lo tanto se desea ahondar y validar sobre los mismos buscando identificar potenciales negocios con lo que hoy son desechos peligrosos no solo para Tronex S.A.S. sino en todo Colombia.

Se pretende probar si es posible usar los residuos en la industria asfáltica y que exista probabilidad de generar nuevos ingresos para la compañía buscando acercarse aún más, a lo llamado economía circular, donde se reduce tanto la entrada de los materiales como la producción de desechos vírgenes, cerrando los “bucles” o flujos económicos y ecológicos de los recursos.

3.1. Pregunta de investigación

¿Puede ser utilizado el coproducto de pilas usadas como insumo en la industria asfáltica?

3.2. Hipótesis

Si los residuos de las pilas usadas de Zinc y Manganeseo, pueden ser utilizados como insumo para la producción de mezcla asfáltica, sin generar variaciones que impidan cumplir la norma para la producción de la misma, dicho residuo industrial, se puede convertir en un producto con mercado potencial.

3.3. Alcance

Se pretende realizar las pruebas específicas que sumen para la aprobación científica y del mercado, para el uso de la masa negra (residuo de las pilas usadas) como insumo para la industria asfáltica y la construcción de carreteras, valorizando así un residuo de la industria de las pilas convirtiéndolo en insumo para la industria de la producción de asfaltos.

3.4. Objetivo General

Identificar si es posible utilizar los residuos de las pilas y baterías usadas, como insumo en la mezcla asfáltica para la construcción de carreteras.

3.5. Objetivos Específicos

- Realizar un estado del arte de la literatura científica relacionada para encontrar estudios que ayuden a definir si se puede valorizar la MN como insumo en la mezcla asfáltica
- Caracterizar química y físicamente la masa negra de las pilas usadas para determinar cantidades y elementos que agreguen o resten valor para que la MN pueda ser insumo en la mezcla asfáltica.
- Realizar pruebas de laboratorio que validen la aplicación de la masa negra como aditivo asfáltico.
- Obtener criterios científicos que permitan valorizar la masa negra y convertirla de residuo a insumo para la producción de asfalto.
- Difundir los resultados científicamente para dar paso a investigaciones posteriores.
- Valorar de manera general el residuo producido (cantidad de baterías producidas y la capacidad de reciclaje y procesamiento para obtener el insumo requerido en la pavimentación de vías a gran escala).

4. METODOLOGÍA

Se consolidó la metodología iniciando con un plan de ensayos que permitió la identificación de los resultados primarios, posteriormente, se validó con otros análisis de laboratorio de Grado PG (Pruebas a las mezclas asfálticas compactadas) temperatura alta según la norma ASTM D 6373 (Asociación Española de Normalización -AENOR-, 2015) que dieron mayor validez a los resultados encontrados.

4.1. Tipo de investigación.

La empresa Tronex S.A.S. desea investigar los aspectos que darían factibilidad técnica, a productos desarrollados con residuos de las pilas o baterías usadas (en la industria asfáltica), con el fin de dar soporte a nuevos negocios potenciales enmarcados en el tema de recuperación de residuos, que no solamente contribuyan con la valorización de los mismos, sino que a su vez promuevan el cierre de ciclo productivo de los procesos incluyendo los esfuerzos ya realizados por el programa de recolección de pilas usadas (RECOPILA), identificando productos altamente diferenciados por el consumidor y mejorando el desempeño ambiental de la Compañía. La presente propuesta de investigación se desarrollará por medio de un enfoque experimental, exploratorio y cualitativo donde a partir del planteamiento del problema se hará una revisión de la literatura y así definir el punto de partida para explorar y experimentar sobre la posibilidad de valorizar el residuo.

4.2. DATOS: Descripción y fuentes

Inicialmente se fundamentará en el análisis de información secundaria (Vigilancia Tecnológica -VT) donde se explora en la literatura científica existente, para luego establecer un plan de ensayos técnicos que permitan obtener información primaria, basado en las recomendaciones encontradas en el ejercicio de VT.

4.3. DATOS: Métodos para obtenerlos

Finalmente se pretende probar técnicamente en laboratorio si la masa negra de las pilas usadas puede ser usada como insumo en las mezclas asfálticas sin variar sus características base, obteniendo los criterios científicos que permitan dar cumplimiento a la norma para la construcción de carreteras y al mismo tiempo valorizar la masa negra convirtiéndola de residuo de la industria de las pilas a insumo para la industria asfáltica.

4.4. SISTEMATIZACIÓN, PROCESAMIENTO, ANÁLISIS, DISEÑO o SÍNTESIS: Métodos para realizarlos

Para desarrollar este proyecto se busca entonces en una primera fase, realizar un ejercicio de vigilancia tecnológica, que permita identificar estudios y análisis destacados a este tipo de residuos, que hayan contribuido significativamente a la

valorización de los mismos. En una segunda fase, mediante el análisis de la información encontrada, definir un plan de ensayos técnicos de laboratorio, a las mezclas asfálticas, basado en las recomendaciones encontradas, fundamentadas en la norma, y que evalúe las variables más importantes. En una tercera fase se pretende evaluar las muestras de mezcla asfáltica con diversos porcentajes de masa negra, para definir si las mismas cumplen las condiciones establecidas en la norma, y garantizan las condiciones óptimas para la construcción de carreteras. Finalmente se pretende dejar las especificaciones técnicas para una prueba piloto en una carretera real.

4.5. RESULTADOS: Métodos de comunicación

Según lo hallado, se pretende redactar un artículo académico, que detalle los resultados, y que sustente la valorización de un residuo para Tronex S.A.S

4.6. Plan de ensayos

Los experimentos realizados, se diseñaron de común acuerdo con una de las industrias de asfaltos más representativas de Colombia (Conasfaltos, 2019), buscando garantizar cumplimiento a los criterios mínimos que exigen este tipo de empresas, para que el producto sea atractivo. Se consideró también la normatividad existente para que las mezclas asfálticas garanticen la calidad exigida para la pavimentación de vías del país (Instituto Nacional de Vías (INVIAS), 2012).

4.6.1. Caracterización de MN

En un primer momento se le realizó a la MN un análisis de la composición química en óxidos por la técnica de Fluorescencia de Rayos X (FRX), la cual facilita la interpretación cuando se cuenta con una composición por óxidos; además permite complementar el balance químico; y con esto se podría tener una propuesta escalable en una etapa posterior, obteniendo los resultados presentados en la Tabla 5:

Tabla 5. Resultados del análisis FRX y las pérdidas por ignición, contenido en porcentaje.

| Nombre de la muestra | Loss on 950°C | SiO ₂ | TiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | Mn ₃ O ₄ | MgO | CaO |
|----------------------|-------------------|------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|--------|
| Masa Negra | 21,6491 | 0.75 | 0,021 | 0,21 | 5,09 | 38,933 | 0,07 | 2,00 |
| Nombre de la muestra | Na ₂ O | K ₂ O | P ₂ O ₅ | SO ₃ | BaO | NiO | CuO | ZnO |
| Masa Negra | 0,672 | 0,462 | 0,013 | 0,66 | 0,446 | 0,324 | 0,58 | 27,963 |

Fuente: Los autores

Los resultados de los óxidos mayoritarios sugieren efectivamente, un gran potencial de concentración y aplicación en varios sectores. Así mismo se realizó una caracterización fisicoquímica cuyos resultados se muestran en la **Tabla 3**.

En un primer momento se buscó evaluar el desempeño de la MN en el asfalto y evaluar cómo modifica sus propiedades físicas, las cuales se tienen como primer criterio de evaluación, bajo condiciones controladas y con una muestra representativa de 20kg de MN. En todos los casos, la MN se usó como adición al total de masa de asfalto. Se planteó el uso de la MN en la Tabla 6, y en un segundo ensayo tamizando la muestra para usar el pasante malla No 200 en la Tabla 7.

Tabla 6. Parámetros y protocolos internos de la empresa para asfaltos (MN sin ningún proceso previo).

| ASFALTO | |
|-------------------------------|------|
| % Óptimo de asfalto (Empresa) | % MN |
| 100 | 0 |
| 98 | 2 |
| 97 | 3 |
| 95 | 5 |

Fuente: Los autores

Tabla 7. Parámetros y protocolos internos de la empresa asfaltos (MN pasante malla No 200)

| ASFALTOS | |
|-------------------------------|------|
| % Óptimo de asfalto (Empresa) | % MN |
| 100 | 0 |
| 98 | 2 |
| 97 | 3 |
| 95 | 5 |

Fuente: Los autores

4.6.2. Variables respuesta

- Viscosidad
- Penetración

4.6.3. Procedimiento

A continuación, se detalla cada uno de los pasos realizados en los experimentos prediseñados con base en la norma INV E 706 (Instituto Nacional de Vías (INVIAS), 2012) y en el laboratorio certificado por el Organismo Nacional de Acreditación de Colombia (ONAC) de la empresa Conasfaltos S.A (Organismo Nacional de Acreditación de Colombia -ONAC-, 2019):

4.6.3.1. Paso I

Cada muestra de asfalto se llevó a una temperatura de 165°C y se le adicionó cada porcentaje de MN, posterior a ello, se dejó en agitación por una hora, como se muestra en la **Figura 1**.

Figura 1. Asfalto a 165°C con adición de masa negra.



Fuente: Los autores

4.6.3.2. Paso II

Terminado el paso 1 se tomó una muestra de 10,5g, para llevar al viscosímetro rotacional (Fig. 2), luego se aumentó de a 0,1 las revoluciones por minuto (rpm), hasta estabilizar el torque en 92-96% valor de referencia de acuerdo con el tipo de asfalto empleado.

Figura 2. RPM 0,73, Torque 95,4%



Fuente: Los autores

4.6.3.3. Paso III

La muestra se llevó a un molde (definido por la norma para asfaltos) hasta el tope y se dejó reposar por una hora, (Fig. 3).

Figura 3. Muestra en molde definido por la norma INV E-706



Fuente: Los autores

4.6.3.4. Paso IV

Una vez cumplido el tiempo definido en el paso III, el molde es llevado a un baño Thanson por una hora (Baño de agua que cumple la especificación que exige la norma (Instituto Nacional de Vías (INVIAS), 2012)) , para estabilizar la muestra a las condiciones del ambiente, como se muestra en la Fig. 4.

Figura 4. Molde con muestra en baño Thanson



Fuente: Los autores

4.6.3.5. Paso V

Transcurrido el tiempo del paso IV, el molde es llevado a un penetrómetro, donde se realizan las medidas por triplicado, penetración para asfaltos (El Asfalto trabajado en el experimento es un asfalto 60-70, es decir con niveles de penetración entre 60 y 70 mm.) con condiciones de temperatura a 25°C, tiempo a 5 segundos, y con una carga móvil total, incluida la aguja, de 100g, como se muestra en la Fig. 5.

Figura 5. Molde con muestra en penetrómetro



Fuente: Los autores

4.6.3.6. Paso VI

Se llevaron a cabo análisis adicionales para dar validez a los resultados obtenidos anteriormente. Lasfalto Colombia SAS utilizó una muestra de 0,8 kg para realizar diferentes ensayos: uno con Asfalto PEN 60/70 (Lasfalto Colombia SAS, 2020) ; otro

con asfalto PEN 60/70 + MN 1% (Lasfalto, 2020) y un tercer ensayo con asfalto PEN 60/70 + MN 3% (Lasfalto Colombia, 2020). Estos ensayos se realizaron con MN de baterías y pilas usadas entre el 30 de enero de 2020 y el 26 de febrero de 2020.

5. RESULTADOS

En la Tabla 8 se presentan los resultados obtenidos de viscosidad para dos patrones de asfalto (en una próxima etapa se espera evaluar las mismas dosificaciones en un solo patrón), un patrón con adición de MN y un patrón con MN tamizada.

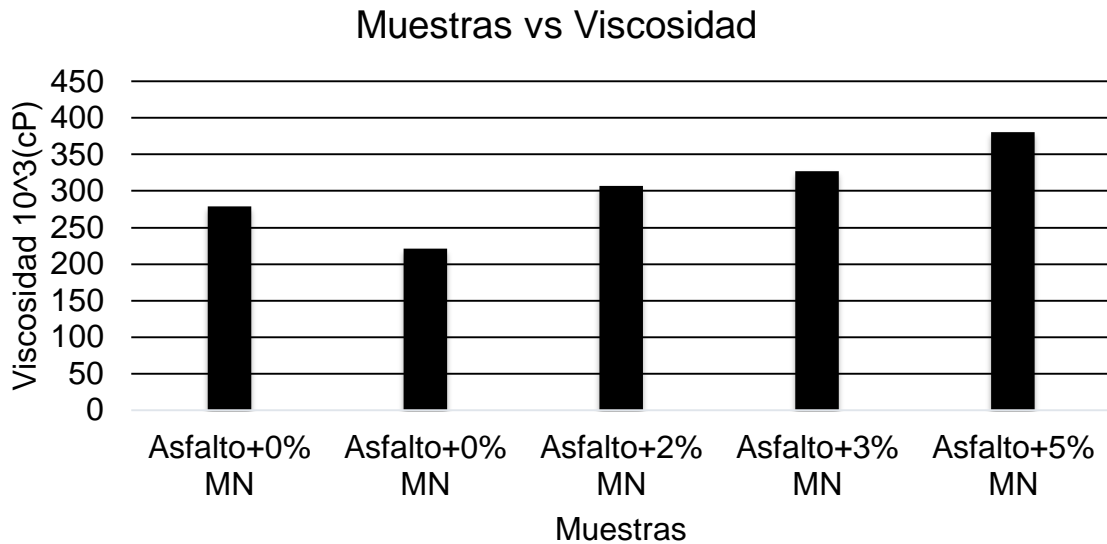
Tabla 8. Resultados de los experimentos con MN en asfaltos

| VISCOSIDAD Y PENETRACIÓN | | | | | | |
|--|----------------|------|--------|-------|-------------|------------------|
| | Muestra | RPM | Torque | T(C°) | $110^3(cP)$ | Penetración(m m) |
| Coproducto MN sin ningún proceso previo | Asfalto+2 % MN | 0,77 | 95,2 | 59,7 | 307 | 61,07 |
| | Asfalto+3 % MN | 0,73 | 95,4 | 58,8 | 327 | 60 |
| | Asfalto+5 % MN | 0,62 | 94,4 | 59,7 | 381 | 59,1 |
| MN Tamizada Malla 200 | Asfalto+2 % MN | 0,7 | 95,5 | 59,8 | 340 | 64,96 |
| | Asfalto+3 % MN | 0,77 | 94 | 60,1 | 306 | 58,17 |
| | Asfalto+5 % MN | 0,66 | 95,8 | 60 | 363 | 54,66 |
| Asfalto sin adición de MN | Asfalto+0 % MN | 0,85 | 95,1 | 59,8 | 279 | 66 |
| | Asfalto+0 % MN | 1,1 | 95,6 | 59,9 | 221 | 69,2 |

Fuente: Los autores

En la Fig. 6, se evidencia que los asfaltos patrón, presentan viscosidades en promedio de $250 \cdot 10^3$ cP y conforme se fue agregando los porcentajes de MN, esta fue aumentando.

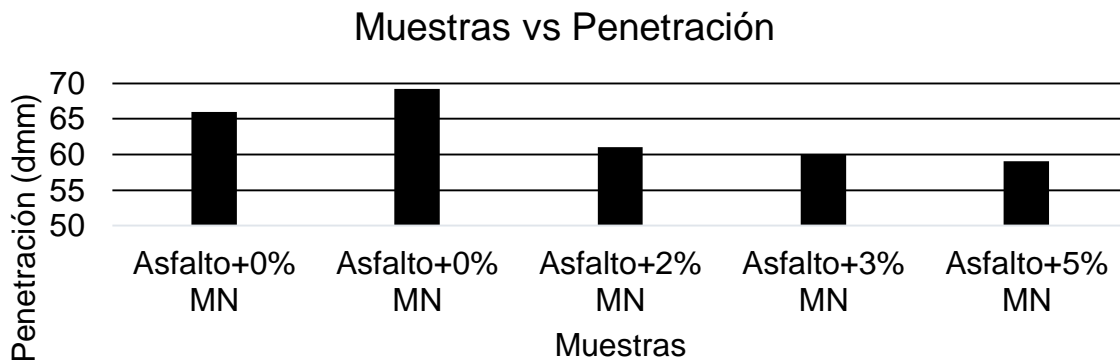
Figura 6. Resultados de viscosidad MN sin tratamiento previo



Fuente: Los autores

En la Fig. 7, se presenta la tendencia para la penetración de las muestras de asfaltos con diferentes adiciones de MN, donde conforme la viscosidad aumenta, los asfaltos se rigidizan, lo que se traduce en penetraciones más bajas a las obtenidas por los patrones.

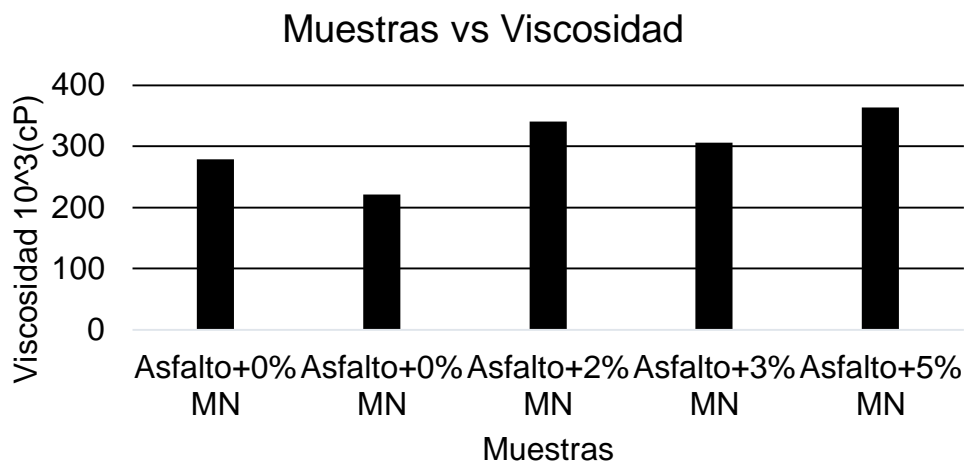
Figura 7. Resultados de penetración MN sin tratamiento previo



Fuente: Los autores

En la Fig. 8, se evidencia que las muestras de asfaltos patrón, tenían viscosidades en promedio de $250 \cdot 10^3$ cP y conforme se fue agregando los porcentajes de MN tamizada, ésta fue aumentando en mayor proporción con un 2%, sin embargo, la viscosidad es menor con los asfaltos adicionados con MN sin tratamiento previo.

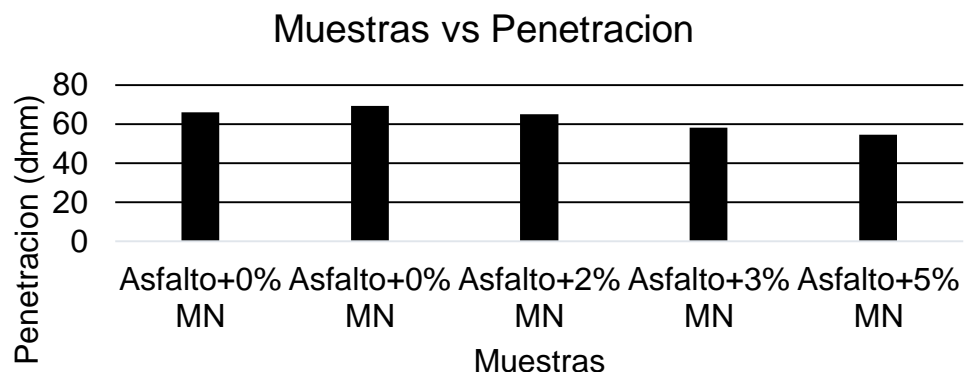
Figura 8. Resultados de penetración, MN Tamizada Malla 200



Fuente: Los autores

En la Fig. 9, se muestra la tendencia que se presentó en las medidas de penetración, conforme la viscosidad aumenta, los asfaltos se rigidizan, lo que se traduce en penetraciones más bajas, pero en este caso, las penetraciones no tuvieron una caída tan significativa, como en los asfaltos adicionados con MN sin tratamiento.

Figura 9. Resultados de penetración MN tamizada malla 200



Fuente: Los autores

En la tabla 9 se presentan los resultados obtenidos en el primer reporte de ensayos de Lasfalto, se puede observar que la prueba cumple con los requisitos en el asfalto original, asfalto residuo de la prueba de película delgada y en asfalto residuo de la prueba envejecimiento a presión:

Tabla 9. Resultados ensayo Asfalto PEN 60/70

| CARACTERÍSTICA | UNIDADES | NORMA DE ENSAYO | Especificación ASTM D 6373-07 | | Resultado | Status |
|--|----------|-----------------|-------------------------------|------|------------|---------------|
| | | | Min. | Max. | | |
| ASFALTO ORIGINAL | | | | | | |
| Viscosidad Brookfield 135°C SC4-27 30 rpm | cP | ASTM D4402 | - | 3000 | 438 | Cumple |
| Punto de ignición mediante la copa abierta Cleveland | °C | ASTM D92 | 230 | - | 306 | Cumple |
| Temperatura de falla, (G*/Sen δ = 1,0 kPa) | °C | ASTM D 7175 | - | - | 68,4 | - |
| Módulo reológico de corte dinámico a 64°C, (G*/senδ) | KPa | ASTM D 7175 | 1,0 | - | 1,685 | Cumple |

| | | | | | | |
|--------------------------------|---|-------------|---|---|------|---|
| Ángulo de fase δ a 64°C | ° | ASTM D 7175 | - | - | 83,8 | - |
|--------------------------------|---|-------------|---|---|------|---|

Asfalto residuo de la prueba de película delgada

| | | | | | | |
|--|-----|-------------|-----|-----|--------------|---------------|
| Pérdida de masa por calentamiento en película delgada en movimiento (163°C, 85 Minutos). | % | ASTM D 2872 | - | 1.0 | 0,4 | Cumple |
| Temperatura de falla, ($G^*/\text{sen}\delta=2.2$ kPa) | °C | ASTM D 7175 | - | - | 70,9 | - |
| Módulo reológico de corte dinámico a 70°C, ($G^*/\text{sen}\delta$) | kPa | ASTM D 7175 | 2,2 | - | 2,479 | Cumple |
| Ángulo de fase δ a 70°C | °C | ASTM D 7175 | - | - | 82,7 | - |

Asfalto residuo de la prueba envejecimiento a presión

| | | | | | | |
|---|----|-------------|---|---|-------------|---|
| Temperatura de falla, ($G^*\text{sen}\delta=5000$ kPa) | °C | ASTM D 7175 | - | - | 20,1 | - |
|---|----|-------------|---|---|-------------|---|

| | | | | | | |
|---|---------------|------------|-----|------|-------------|---------------|
| Módulo reológico de corte dinámico a 25°C, (G*senδ) | kPa | ASTM D7175 | - | 5000 | 2702 | Cumple |
| Rigidez en CREEP a -12°C, 60 s. S(t) | MPa | ASTM D6648 | - | 300 | 102 | Cumple |
| Valor m(t) a -12°C, 60s. S(t) | Adimension al | ASTM D6648 | 0,3 | - | 0,33 | Cumple |

Fuente: (Lasfalto Colombia SAS, 2020)

En la tabla 10 se presentan los resultados obtenidos en el segundo reporte de ensayos de Lasfalto, en esta oportunidad, al igual que el ensayo anterior, se evidencia que el ensayo cumple en el asfalto original, asfalto residuo de la prueba de película delgada y en asfalto residuo de la prueba envejecimiento a presión:

Tabla 10. Resultados ensayo Asfalto PEN 60/70+ MN 1%

| CARACTERÍSTICA | UNIDADES | NORMA DE ENSAYO | Especificación ASTM D 6373-07 | | Resultado | Status |
|---|----------|-----------------|-------------------------------|------|------------|---------------|
| | | | Min. | Max. | | |
| ASFALTO ORIGINAL | | | | | | |
| Viscosidad Brookfield 135°C SC4-27 30 rpm | cP | ASTM D4402 | - | 3000 | 410 | Cumple |
| Punto de ignición | °C | ASTM D92 | 230 | - | 304 | Cumple |

| | | | | | | |
|--|-----|-------------|-----|---|--------------|---------------|
| mediante la copa abierta Cleveland | | | | | | |
| Temperatura de falla, (G*/senδ= 1.0 kPa) | °C | ASTM D 7175 | - | - | 69,1 | - |
| Módulo reológico de corte dinámico a 64°C, (G*/senδ) | kPa | ASTM D 7175 | 1,0 | - | 1,915 | Cumple |
| Ángulo de fase δ a 64°C | ° | ASTM D 7175 | - | - | 85,5 | - |

Asfalto residuo de la prueba de película delgada

| | | | | | | |
|--|-----|-------------|-----|-----|--------------|---------------|
| Pérdida de masa por calentamiento en película delgada en movimiento (163°C, 85 Minutos). | % | ASTM D 2872 | - | 1,0 | 0,5 | Cumple |
| Temperatura de falla, (G*/senδ= 2.2 kPa) | °C | ASTM D 7175 | - | - | 70,9 | - |
| Módulo reológico de corte dinámico a | kPa | ASTM D 7175 | 2,2 | - | 2,497 | Cumple |

| | | | | | | |
|-------------------------|----|-------------|---|---|-------------|---|
| 70°C, (G*/senδ) | | | | | | |
| Ángulo de fase δ a 70°C | °C | ASTM D 7175 | - | - | 77,1 | - |

Asfalto residuo de la prueba envejecimiento a presión

| | | | | | | |
|---|--------------|-------------|-----|------|-------------|---------------|
| Temperatura de falla, (G*senδ=5000 kPa) | °C | ASTM D 7175 | - | - | 22,2 | - |
| Módulo reológico de corte dinámico a 25°C, (G*senδ) | kPa | ASTM D7175 | - | 5000 | 3993 | Cumple |
| Rigidez en CREEP a -12°C, 60 s. S(t) | MPa | ASTM D6648 | - | 300 | 165 | Cumple |
| Valor m(t) a -12°C, 60s. S(t) | Adimensional | ASTM D6648 | 0,3 | - | 0,34 | Cumple |

Fuente: (Lasfalto, 2020)

En la tabla 11 se presentan los resultados obtenidos en el tercer reporte de ensayos de Lasfalto, al igual que en los ensayos anteriores, se evidencia que los resultados cumplen en los mismos ítems que en las 2 pruebas iniciales, mostrando así coherencia en los resultados:

Tabla 11. Resultados ensayo Asfalto PEN 60/70+ MN 3%

| CARACTERÍSTICA | UNIDADES | NORMA DE ENSAYO | Especificación ASTM D 6373-07 | | Resultado | Status |
|---|----------|-----------------|-------------------------------|------|--------------|---------------|
| | | | Min. | Max. | | |
| ASFALTO ORIGINAL | | | | | | |
| Viscosidad Brookfield 135°C SC4-27 30 rpm | cP | ASTM D4402 | - | 3000 | 448 | Cumple |
| Punto de ignición mediante la copa abierta Cleveland | °C | ASTM D92 | 230 | - | 305 | Cumple |
| Temperatura de falla, (G*/senδ=1.0 kPa) | °C | ASTM D 7175 | - | - | 70,2 | - |
| Módulo reológico de corte dinámico a 70°C, (G*/senδ) | kPa | ASTM D 7175 | 1,0 | - | 1,036 | Cumple |
| Ángulo de fase δ a 70°C | ° | ASTM D 7175 | - | - | 86,5 | - |
| Asfalto residuo de la prueba de película delgada | | | | | | |
| Pérdida de masa por calentamiento en película | % | ASTM D 2872 | - | 1,0 | 0,5 | Cumple |

| | | | | | | |
|--|-----|-------------|-----|---|--------------|---------------|
| delgada en movimiento (163°C, 85 Minutos). | | | | | | |
| Temperatura de falla, (G*/senδ=2.2 kPa) | °C | ASTM D 7175 | - | - | 72,1 | - |
| Módulo reológico de corte dinámico a 70°C, (G*/senδ) | kPa | ASTM D 7175 | 2,2 | - | 2,922 | Cumple |
| Ángulo de fase δ a 70°C | °C | ASTM D 7175 | - | - | 82,0 | - |

Asfalto residuo de la prueba envejecimiento a presión

| | | | | | | |
|---|--------------|-------------|-----|------|-------------|---------------|
| Temperatura de falla, (G*senδ=5000 kPa) | °C | ASTM D 7175 | - | - | 25,8 | - |
| Módulo reológico de corte dinámico a 28°C, (G*senδ) | kPa | ASTM D7175 | - | 5000 | 3852 | Cumple |
| Rigidez en CREEP a -12°C, 60 s. S(t) | MPa | ASTM D6648 | - | 300 | 170 | Cumple |
| Valor m(t) a -12°C, 60s. S(t) | Adimensional | ASTM D6648 | 0,3 | - | 0,31 | Cumple |

Fuente: (Lasfalto Colombia, 2020)

4.2. Análisis de resultados

Se puede resaltar que los resultados obtenidos en la prueba de penetración estaban cercanos al asfalto que se usa convencionalmente (entre 60-70 mm); para la producción de un asfalto convencional no se cumple en los casos:

- Al adicionar un 5% de MN sin ningún proceso previo al asfalto (penetración 59,1mm).
- Al adicionar un 3% de MN tamizada por una malla 200 al asfalto (penetración 58,17mm).
- Al adicionar un 5% de MN tamizada por una malla 200 al asfalto (penetración 54,66mm).

En cuanto a los tres ensayos realizados por Lasfalto Colombia SAS:

- Asfalto PEN 60/70
- Asfalto PEN 60/70 + MN 1%
- Asfalto PEN 60/70 + MN 3%

Se encontró que en todos se cumplió satisfactoriamente respecto a su grado de desempeño (PG) 70-22, 64-22 y 64-22. Además, la respuesta a baja temperatura del asfalto (Rigidez después del envejecimiento) para los tres ensayos se consideró como óptima.

6. DISCUSIÓN

Es importante realizar pruebas en campo con el ánimo de validar en tiempo real el comportamiento de las mezclas, la rigidez y durabilidad o envejecimiento, en las diferentes condiciones climáticas naturales.

De los resultados en campo, dependerá finalmente que el producto pueda comercializarse, en definitiva. Pero ya da solución al problema de los residuos generados de las pilas y baterías usadas. En general, la investigación sujeta a este artículo, permitió convertir mediante una adecuada gestión tecnológica, un residuo de la industria de pilas y baterías en un insumo para la industria asfáltica; una idea más mercado (innovación tecnológica).

Es importante definir el método de protección de la propiedad intelectual que permita posteriormente expandir la innovación a otros nichos de mercado nacional e internacional, dado que da solución a una problemática que a nivel mundial representa altos costos tanto de huella ecológica como económicos para la industria manufacturera de pilas y baterías.

Por otra parte, el ejercicio de gestión tecnológica realizado con el residuo en cuestión, permitió un acercamiento a las industrias involucradas con lo hoy llamado economía circular (D.W. Pearce, 1990), y al mismo tiempo, al objetivo de desarrollo sostenible Nro 9 (industria, innovación e infraestructura); Nro 11 (ciudades y comunidades sostenibles); Nro 12 (producción y consumo responsable); y en una segunda instancia al Nro 13 (acción por el clima); Nro 15 (vida de ecosistemas terrestres); y Nro 17 (alianzas para lograr los objetivos).

El ejercicio de gestión tecnológica permitió también la articulación de actores clave del ecosistema de innovación de la ciudad de Medellín. Mediante el trabajo colaborativo y en equipo para dar solución a una problemática nacional e internacional, cumpliendo los pactos de ciencia, tecnología e innovación locales y nacionales, y a la vez, permitiendo el desarrollo de nuevos productos con valor agregado y diferenciadores para el mercado.

7. CONCLUSIONES

La industria de asfaltos e infraestructura, facilita la inclusión del coproducto MN, ya que no requiere de procesos adicionales.

Las pruebas señalaron que conforme aumenta el contenido de MN en el asfalto, incrementa la viscosidad y se reduce la penetración, por esta razón, es necesario la realización de pruebas de campo para evaluar su comportamiento en condiciones reales.

Con los análisis adicionales realizados a la mezcla patrón y con masa negra, se determinó con mayor nivel de precisión las variaciones de la mezcla patrón y evaluaciones de desempeño, permitiendo concluir que, la mezcla asfáltica compactada incluyendo como insumo la masa negra, cumple satisfactoriamente un grado de desempeño 64-22 y 70-22 (según la norma (Asociación Española de Normalización -AENOR-, 2015)), y que la prueba concluyó que se da una respuesta óptima a la rigidez del envejecimiento a baja temperatura del asfalto en ambos análisis.

Se puede considerar el coproducto MN como un aditivo que incrementa la viscosidad del asfalto.

BIBLIOGRAFÍA

Alloway, B. J. (2008). *Zinc in Soils and crop nutrition*. Obtenido de Zinc Nutrient Initiative: https://crops.zinc.org/wp-content/uploads/sites/11/2016/12/pdf_2008_IZA_IFA_ZincInSoils.pdf

Asociación Española de Normalización -AENOR-. (Enero de 2015). ASTM D 6373. *Standard Specification for Performance Graded Asphalt Binder*. Estados Unidos.

Biointropic. (21 de Marzo de 2019). Análisis estratégico y de mercado. *Proyecto de valorización de potencial de mercado de productos desarrollados a partir de residuos (masa negra) de las pilas y baterías*. Medellín, Antioquia, Colombia. Recuperado el 16 de Septiembre de 2019

Biointropic. (2019). *Estudio Técnico: Proyecto de valorización del potencial de mercado de productos desarrollados a partir de residuos (masa negra) de pilas y baterías usadas de Zinc y Manganeso*. Informe Técnico, Corporación Biointropic, Antioquia, Medellín. Recuperado el 01 de Octubre de 2019

Boulding, K. (1966). The economics of the coming spaceship earth. (H. Jarrett, Ed.) *Environmental Quality Issues in a Growing Economy*, 3-14. Recuperado el 10 de Octubre de 2019

Conasfaltos. (06 de Septiembre de 2019). *Consfaltos*. Obtenido de Consfaltos: <https://conasfaltos.com/>

D.W. Pearce, &. R. (01 de 02 de 1990). *Economics of Natural Resources and the*

Environment. London, England. doi:10.2307/1242904

El Congreso de Colombia. (9 de Enero de 1996). LEY 253 DE 1996. *LEY 253 DE 1996(Diario Oficial No. 42.688)*. Basilea, Colombia. Recuperado el 16 de Septiembre de 2019, de http://quimicos.minambiente.gov.co/images/Respel/l_253_1996_basilea.pdf

El Congreso de Colombia. (27 de Noviembre de 2008). LEY 1252 DE 2008. *LEY 1252 DE 2008*. Bogotá, Cundinamarca, Colombia. Recuperado el 16 de Septiembre de 2019, de http://quimicos.minambiente.gov.co/images/Respel/l1252_2008_prohibitivas_respel.pdf

El Congreso de Colombia. (19 de Julio de 2013). LEY 1672 DE 2013. *LEY 1672 DE 2013*. Bogotá, Cundinamarca, Colombia. Recuperado el 16 de Septiembre de 2019, de http://quimicos.minambiente.gov.co/images/RAEE/ley_1672_2013.pdf

F. R. Quintela y R. C. Redondo Melchor. (2020). Diccionario de Ingeniería Eléctrica. (U. d. Salamanca, Ed.) *Universidad de Salamanca*. Recuperado el 09 de Abril de 2020, de <https://electricidad.usal.es/Principal/Circuitos/Diccionario/Inicio.php>

Gen-Triz & Tronex SAS. (2019). *Project Black Mass AMI*. Medellín: GEN-TRIZ.

Georgescu-Roegen, N. (1971). *The Entropy Law and the Economic Process*. *Harvard University Press*, 23. Recuperado el 10 de Octubre de 2019

Ha Phuong Tran, T. S. (Agosto de 2018). Recycling portable alkaline/ZnC batteries for

a circular economy: An assessment of natural resource consumption from a life cycle and criticality perspective. *Resources, Conservation and Recycling*, 138, 265-278. doi:<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.08.018>

Hidalgo G, M. d. (01 de Agosto de 2017). Un nuevo impulso hacia la economía circular. (I. E. -IEEE-, Ed.) *Instituto Español de Estudios Estratégicos -IEEE-(39)*, 1-14. Recuperado el 09 de Septiembre de 2019, de http://www.ieee.es/Galerias/fichero/docs_analisis/2017/DIEEEA39-2017_Economia_circular_MMHG.pdf

Im, H. H. (15 de Abril de 2010). *Estados Unidos Patente nº 20100090377*. Recuperado el Julio de 2019, de <http://www.freepatentsonline.com/y2010/0090377.html>

Instituto Nacional de Vías (INVIAS). (2012). Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras. *Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras, Capítulo 4. Pavimentos Asfálticos*. Colombia: Instituto Nacional de Vías. Recuperado el 06 de Septiembre de 2019

Instituto Nacional de Vías (INVIAS). (2012). Normas de ensayo de materiales para carreteras. *Determinación del contenido orgánico del suelo mediante el ensayo de pérdida por ignición, Sección 100-Suelos. E-121*. Colombia. Recuperado el 15 de Septiembre de 2019, de <ftp://ftp.ani.gov.co/Licitaci%C3%B3n%20VJVGCCLP%20001-2016-M-1/Normas%20de%20Ensayo%20de%20materiales%20para%20carreteras/SECCI%C3%93N%20100.pdf>

J. Park, J. S. (Noviembre de 2010). Creating integrated business and environmental value within the context of China's circular economy and ecological modernization. *Journal of Cleaner Production*, 18(15), 1494-1501. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.06.001>

Lasfalto. (30 de Enero de 2020). Reporte de ensayos Asfalto PEN 60/70 + MN 1%. Medellín, Colombia.

Lasfalto Colombia. (30 de Enero de 2020). Reporte de ensayos Asfalto PEN 60/70 + MN 3%. Medellín, Colombia.

Lasfalto Colombia SAS. (30 de Enero de 2020). Reporte de Ensayos Asfalto PEN 60/70. Medellín, Colombia.

Levanen Jarkko, L. T. (2018). Modelling the Interplay Between Institutions and Circular Economy Business Models: A Case Study of Battery Recycling in Finland and Chile. *Ecological Economics*, 373-382. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.08.018>

Meizhu Chen, J. L. (Octubre de 2011). Potential of recycled fine aggregates powder as filler in asphalt mixture. *Construction and building materials*, 25(10). doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.04.022>

Organismo Nacional de Acreditación de Colombia -ONAC-. (17 de Septiembre de 2019). ONAC. Recuperado el 17 de Septiembre de 2019, de ONAC: <https://onac.org.co/>

Organización de las Naciones Unidas -ONU-. (10 de Octubre de 2019). *Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD)*. Recuperado el 10 de Octubre de 2019, de Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD): <https://www.undp.org/content/undp/es/home/sustainable-development-goals.html>

Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico -OCDE. (2002). *Manual de Frascatti*. (F. E. -FECYT-, Ed.) París, Francia. Recuperado el 10 de Octubre de

2019, de
http://www.ciencia.gob.es/stfls/MICINN/Investigacion/FICHEROS/ManuaFrascati-2002_sp.pdf

P. Ghisellini, C. C. (2016). Una revisión sobre economía circular: la transición esperada a una interacción equilibrada de los sistemas ambientales y económicos. *Journal of Cleaner Production*(114), 11-32. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007>

Recopila. (25 de Noviembre de 2019). *RECOPILA*. Obtenido de RECOPILA: <http://www.recopila.org/>

ROBLEDO V., J. (2017). *Introducción a la Gestión de la Tecnología y la Innovación*. Medellín, Antioquia, Colombia: Universidad Nacional de Colombia. Recuperado el 10 de 10 de 2019, de https://minas.medellin.unal.edu.co/descargas/Robledo_2017_Introduccion_a_la_gestion_de_la_tecnologia_y_la_innovacion.pdf

Sangiorgi, C., Tataranni, P., Mazzotta, F., Simone, A., Vignali, V., & Lantieri, C. (3 de Junio de 2017). Alternative Fillers for the Production of Bituminous Mixtures: A Screening Investigation on Waste Powders. *Coatings*. doi:<https://doi.org/10.3390/coatings7060076>

Universidad de Antioquia & Tronex S.A.S. (2018). *Separación de Zn y Mn a partir de residuo TRONEX*. Medellín.

Wasilewska, M. &. (2017). Evaluation of Different Mineral Filler Aggregates for Asphalt Mixtures. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 245. doi:[doi:10.1088/1757-899X/245/2/022042](https://doi.org/10.1088/1757-899X/245/2/022042)

ANEXOS

Anexo 1. Cronograma

| Actividad \ TRIMESTRE | Trimestre 1 | Trimestre 2 | Trimestre 3 | Trimestre 4 | Horas |
|---|-------------|-------------|-------------|-------------|-------|
| Actividad 1: Elaboración anteproyecto | 20 | | | | |
| Actividad 2: Vigilancia Tecnológica | | 480 | | | |
| Actividad 3: Plan de ensayos técnicos de laboratorio | | | 480 | | |
| Actividad 4: Evaluación de muestras de mezcla asfáltica con diversos porcentajes de masa negra | | | | 240 | |
| Actividad N 5: Redacción y postulación de artículo a revista | | | | | 40 |
| Horas Totales del Proyecto | | | | | 1.260 |

Anexo 2. Presupuesto

| RECURSO | Unidad | Valor | Cantidad | Valor TOTAL aportado por | | |
|------------------------|--------|------------|----------|--------------------------|----------|----------|
| | | Unidad | | Estudiante | UPB | Externos |
| Trabajo Estudiante | Hora | \$ 50.000 | 290 | \$14.500.000 | \$ - | \$ - |
| Director de Trabajo de | Hora | \$ 130.000 | 20 | \$ - | \$2.600. | \$ - |

| | | | | | | |
|---|---------|--------------|-----|----------------------|--------------------|-------------|
| Grado | | | | | 000 | |
| Trabajo Jurado | Hora | \$ 140.000 | 10 | | \$1.400.000 | \$ - |
| Transporte | Viajes | \$ 6.000 | 50 | \$300.000 | \$ - | \$ - |
| Acceso a Internet | Meses | \$ 50.000 | 12 | \$600.000 | \$ - | \$ - |
| Equipos/ Computador | Maquina | \$ 2.000.000 | 1 | \$ - | \$ - | \$ - |
| Búsqueda en bases de datos especializadas | Hora | \$ 50.000 | 40 | \$2.000.000 | \$ - | \$ - |
| Fotocopias e impresiones | Copia | 100 | 150 | \$15.000 | \$ - | \$ - |
| SUBTOTAL | | | | \$17.415.000 | \$4.000.000 | \$ - |
| Imprevistos (10%) | | | | \$ 1.741.500 | \$ 400.000 | \$ - |
| SUBTOTAL | | | | \$ 19.156.500 | \$4.400.000 | \$ - |
| TOTAL | | | | \$ 23.556.500 | | |

Anexo 3. Concepto ético

La presente información no tiene implicaciones ambientales, no afecta a los animales ni tampoco al ser humano. Con respecto a la información, se hará la búsqueda exhaustiva de la temática a tratar en las diferentes fuentes de información, respetando en todo momento los derechos de autor y la propiedad intelectual de los artículos encontrados y haciendo referencia a estos cuando sea necesario a lo largo del trabajo.

Anexo 4. Líneas de Investigación del proyecto

| Área | Porcentaje de Contenido |
|---|-------------------------|
| Historia y Filosofía de la Ciencia, la Tecnología y la Innovación | |
| Gestión del Conocimiento | |
| Pensamiento Sistémico y Simulación | |
| Gestión de la Investigación y el Desarrollo Experimental | 30% |
| Vigilancia y Prospectiva Tecnológica | 5% |
| Transferencia de Tecnología | |
| Política de Ciencia, Tecnología e Innovación | |
| Visibilidad y Evaluación de la Ciencia | |
| Economía de la Innovación y del Cambio Técnico | 35% |
| Formulación y Evaluación de Proyectos | |
| Gerencia Estratégica de Proyectos | 30% |
| Total | 100 |