

**PROPUESTA PARA MITIGAR EL IMPACTO AMBIENTAL GENERADO POR LA
EMISIÓN DE MATERIAL PARTICULADO EN VÍAS Terciarias, MEDIANTE
EL DESARROLLO DE UNA ESTRUCTURA ESTABILIZADA DE SUBRASANTE
SUELO-CEMENTO-CAL CON INCORPORACIÓN DE POLVILLO DE LLANTA
USADA**

**CLAUDIA DIMELSA LIZCANO AFRICANO
NATHALIA BEDOYA CARVAJAL**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL
BUCARAMANGA
2014**

**PROPUESTA PARA MITIGAR EL IMPACTO AMBIENTAL GENERADO POR LA
EMISIÓN DE MATERIAL PARTICULADO EN VÍAS TERCIARIAS, MEDIANTE
EL DESARROLLO DE UNA ESTRUCTURA ESTABILIZADA DE SUBRASANTE
SUELO-CEMENTO-CAL CON INCORPORACIÓN DE POLVILLO DE LLANTA
USADA.**

**CLAUDIA DIMELSA LIZCANO AFRICANO
NATHALIA BEDOYA CARVAJAL**

**Monografía para optar al título de
Especialista en ingeniería Ambiental**

**Director
MCS. GUILLERMO CARDOZO CORREA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL
BUCARAMANGA**

2014

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	14
1. OBJETIVOS.....	16
1.1. OBJETIVO GENERAL	16
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
2. MARCO TEÓRICO	17
2.1. PROBLEMÁTICA CONTAMINACIÓN AMBIENTAL POR MATERIAL PARTICULADO EN VÍAS TERCIARIAS.....	17
2.2 MÉTODOS UTILIZADOS EN EL CONTROL DE MATERIAL PARTICULADO	18
2.2.1 Sistemas de tratamiento en la estabilización de vías terciarias	19
2.2.1.1 Riego con agua.....	19
2.2.1.2 Estabilizantes químicos.....	20
2.2.1.3 Láminas filtrantes sintéticas	20
2.3 IMPACTO AMBIENTAL DE MATERIAL PARTICULADO	21
2.3.1. Aire.	21
2.3.2 Agua.	21
2.3.3. Fauna.....	22
2.3.4. Flora.....	22
2.4. PROBLEMÁTICA POR DISPOSICION FINAL DE RESIDUOS	22
2.4.1 Disposición final de llantas usadas.	22
2.4.2. Tecnologías para el aprovechamiento de las llantas en desuso.....	23
2.4.2.1 Termólisis.....	24
2.4.2.2 Pirolisis.....	24
2.4.2.3 Incineración.....	24
2.4.2.4 Trituración Criogénica	25

2.4.2.5 Trituración Mecánica.....	25
2.5. IMPACTO AMBIENTAL DE LAS LLANTAS EN DESUSO.....	25
2.5.1 Aire.	25
2.5.2 Agua.	26
2.5.3 Suelo.....	26
2.5.4 Paisaje.	26
2.6. PROPUESTA DE SOLUCIÓN DE LA GENERACIÓN DE MATERIAL PATICULADO, CON EL USO DE LLANTAS, DENTRO DEL CONTEXTO DE ESTABILIZACIÓN DE VÍAS Terciarias.....	27
2.7 PARÁMETROS BÁSICOS A EVALUAR.....	27
3. MARCO LEGAL.....	29
3.1. DECRETO 948 DE JUNIO 5 DE 1995 - REGLAMENTO DE PROTECCIÓN Y CONTROL DE LA CALIDAD DEL AIRE.	29
3.1.1 Artículo 3.....	29
3.1.2 Artículo 4.....	29
3.1.3 Artículo 18.....	29
3.1.4 Artículo 26.....	30
3.2 RESOLUCIÓN 1457 DE JULIO 29 DE 2010 SISTEMAS DE RECOLECCIÓN SELECTIVA, Y GESTIÓN AMBIENTAL DE LLANTAS USADAS.....	30
3.2.1 Artículo 1.....	30
3.2.2 Artículo 13.....	30
3.2.3 Artículo 14.....	31
3.2.4. Artículo 16.....	31
3.3. NORMA TÉCNICA COLOMBIANA GTC 24 GESTIÓN AMBIENTAL, RESIDUOS SOLIDOS, SEPARACIÓN EN LA FUENTE.....	32
4. METODOLOGÍA.....	33
4.1 MATERIALES Y FABRICACIÓN DE BRIQUETAS.....	33

4.2 RELACIÓN DE MATERIALES PARA MEZCLAS ELABORADAS	35
4.3 DESCRIPCIÓN PRUEBA DE DESGASTE POR RODAMIENTO	36
4.4 DESCRIPCIÓN ANÁLISIS DE TAMAÑO DE PARTÍCULAS POR TAMIZADO	40
5. DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	41
5.1 PRUEBA DE DESGASTE POR RODAMIENTO	41
5.2 ANÁLISIS DE TAMAÑO DE PARTÍCULAS POR TAMIZADO	45
5.3 COSTO – BENEFICIO AMBIENTAL POR LA REDUCCIÓN DE MATERIAL PARTICULADO CON LA RECUPERACIÓN DE LA LLANTA USADA	47
6. CONCLUSIONES	52
7. RECOMENDACIONES	54
BIBLIOGRAFÍA	58

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Composición típica de las llantas radiales	23
Tabla 2. Tipos de residuos para la separación en la fuente.....	32
Tabla 3. Dimensiones utilizadas en la elaboración de briquetas.....	34
Tabla 4. Mezclas realizadas para pruebas de desgaste por rodamiento.	38
Tabla 5. Listado y descripción de las pruebas a realizadas con las mezclas señaladas.	39
Tabla 6. Residuo generado por las briquetas que completaron los 6 min en la prueba de desgaste.	40
Tabla 7. Resultados obtenidos en la prueba de desgaste por rodamiento.	43
Tabla 8. Resultados obtenidos en la prueba Tamizado.	46
Tabla 9. Costos para riego con agua de 4 km de vía terciaria.	48
Tabla 10. Costos para riego con agua + aditivo de 4 km de vía terciaria.	48
Tabla 11. Dimensiones para generar costo de 4 km de carretera.	49
Tabla 12. Costos para la estabilización de 24000 m ² de suelo en vías terciarias..	50

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Métodos sugeridos por el Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible para el control del polvo [9].	19
Figura 2. Pista de transporte con lámina filtrante [10].	21
Figura 3. Llanta pulverizada de la empresa Mundo Limpio.	34
Figura 4. Montaje de la prueba de desgaste por rodamiento en seco con una rueda.	37
Figura 5. Prueba de tamizado realizada a residuo de las briquetas.	40
Figura 6. Briqueta con tratamiento térmico antes y después de la prueba de desgaste.	44
Figura 7. Briquetas sin tratamiento térmico, lado izquierdo 4R y lado derecho 1R.	45

LISTA DE GRÁFICAS

Pág.

Gráfica 1. Comparación de % volumen perdido en la prueba de desgaste.	42
Gráfica 2. Comparación de los porcentajes retenidos en cada tamiz.	46

RESUMEN

TITULO: PROPUESTA PARA MITIGAR EL IMPACTO AMBIENTAL GENERADO POR LA EMISIÓN DE MATERIAL PARTICULADO EN VÍAS Terciarias, MEDIANTE EL DESARROLLO DE UNA ESTRUCTURA ESTABILIZADA DE SUBRASANTE SUELO-CEMENTO-CAL CON INCORPORACIÓN DE POLVILLO DE LLANTA USADA.*

AUTORES: NATHALIA BEDOYA CARVAJAL, CLAUDIA DIMELSA LIZCANO AFRICANO**

PALABRAS CLAVE: Material particulado, contaminación atmosférica, subrasante, llanta usada, reciclaje de llanta.

RESUMEN:

La ejecución de obras civiles requiere la adecuación de terrenos con el desarrollo de actividades que generan un aumento en los niveles de emisión de partículas suspendidas o sedimentables, que en la mayoría de los casos implica la modificación de las condiciones de los recursos naturales: aire, agua, fauna y flora. La contaminación atmosférica generada por material particulado causa problemas significativos a la salud humana.

Actualmente, las llantas usadas representan un problema ambiental grave debido al aumento considerable en la producción de desechos sólidos e inadecuada disposición final, debido a que han sido diseñadas para resistir a la degradación física, química y biológica, sin embargo estudios han demostrado el reciclaje, como una alternativa de solución ante la problemática ambiental generada por este residuo, encontrando importantes aplicaciones tanto económicas como ecológicas para la industria.

El presente trabajo tiene como objetivo proponer una alternativa para mitigar el impacto ambiental generado por la emisión de material particulado en vías terciarias, mediante el desarrollo de una estructura estabilizada de subrasante suelo-cemento-cal con incorporación de polvillo de llanta usada. Se realizaron pruebas de laboratorio con el fin de evaluar condiciones de desgaste por rodamiento, teniendo en cuenta los volúmenes perdidos en el ensayo por cada muestra y la generación de material de polvo, utilizando tamices de diferentes tamaños; para el desarrollo de las pruebas se incorporó el polvillo de llanta en dos eventos, sin temperatura y con temperatura. Se encontró que la muestra que arrojó mejores resultados no requirió de energía adicional para su secado, reduciendo los costos de su fabricación.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Especialización en Ingeniería Ambiental. Director: Guillermo Cardozo Correa

ABSTRACT

TITLE: PROPOSAL TO MITIGATE ENVIRONMENTAL IMPACT GENERATED BY THE ISSUANCE OF PARTICULATE MATTER TERTIARY ROADS, THROUGH THE DEVELOPMENT OF A STABILIZED STRUCTURE SUBGRADE SOIL-CEMENT-LIME WITH INCORPORATION OF DUST USED TIRE *

AUTHOR: NATHALIA BEDOYA CARVAJAL, CLAUDIA DIMELSA LIZCANO AFRICANO **

KEY WORDS: Particulate Matter, air Pollution, subgrade, used tire, tire recycling.

CONTENT:

The execution of civil works requires the adaptation of land with development activities leading to increased emission levels of suspended or settleable particles, which in most cases involves the modification of the conditions of natural resources, including air, water, fauna and flora. The air pollution from particulate matter causes significant human health problems.

At present, used tires cause serious environmental problems due to the considerable increase in the production of end solid waste and inadequate final disposal because they are designed to resist physical, chemical and biological degradation; however studies have shown recycling as an alternative solution to the environmental problems generated by this waste, with significant ecological and low-cost applications for industry.

This paper aims to propose an alternative to mitigate the environmental impact caused by the emission of particulate matter in tertiary roads through the development of a stabilized subgrade soil-cement-lime dust incorporation of used tire structure. Laboratory tests were conducted to evaluate wear and bearing conditions, taking into account the lost volume in the test for each sample and generating powder material, using sieves of different sizes; development of tests the tire dust joined two events with and without temperature. Our best results show that no additional energy is required for drying, reducing manufacturing costs.

* Thesis

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. School of Chemical Engineering. Specialization in Environmental Engineering. Director: Guillermo Cardozo Correa.

INTRODUCCIÓN

Durante la ejecución de obras civiles se desarrollan actividades relacionadas con adecuación de terrenos, movimientos de tierra, transporte de materiales, transporte de vehículos, entre otros; los cuales generan un incremento en la emisión de material particulado, que temporalmente puede ocasionar niveles de inmisión elevados de partículas en suspensión y sedimentables. La magnitud de estos impactos puede resultar mínima en la mayor parte de la extensión de la carretera, sin embargo tienden a ser más significativos en los trayectos cercanos de las ciudades, pequeños núcleos urbanos y comunidades rurales [1]. Los niveles de inmisión o de calidad del aire determinan el efecto de un contaminante sobre la salud o el medio ambiente [2]. Actualmente las soluciones para evitar la formación de polvo, como los productos paliativos anti polvo, no alcanzan las expectativas de los consumidores, generando inconvenientes con las poblaciones ubicadas en las áreas de influencia directa.

Las limitantes más importantes en el diseño y ejecución de vías se deben a aspectos económicos y ambientales; por lo tanto, las soluciones tienden a nuevas tecnologías con métodos más eficaces y menos agresivos con el medio ambiente, siendo la llanta usada una alternativa para la estabilización de suelos y conformación de la estructura de pavimento [3].

Actualmente, las llantas en desuso han generado un aumento significativo en la producción de desechos sólidos, centrando especial preocupación, debido a que han sido diseñadas para ser extremadamente resistentes a la degradación física, química y biológica, lo que dificulta su reciclaje y posterior procesamiento [4]. En el mundo se producen más de 1 billón de unidades (llantas) en el año, mientras que en Colombia la producción anual se calcula en 200.000 unidades [5]. En nuestro

país, la mayoría de llantas son quemadas a cielo abierto con el fin de extraer el entramado metálico o, bien, incineradas en hornos industriales para aprovechar su contenido energético [4]; por lo tanto, el reciclaje de llantas usadas se muestra como una alternativa de solución ante la problemática ambiental generada por la mala disposición de este residuo, encontrando importantes aplicaciones tanto económicas como ecológicas para la industria.

Con el propósito de agregarle valor a un residuo de difícil manejo y así mismo minimizar el impacto ambiental ocasionado por la inmisión de material particulado en vías terciarias, se expone una alternativa antipolvo, utilizando polvillo de llanta en desuso para mezclas suelo-cemento, a fin de disminuir la emisión de este material sobre las vías de acceso (vías terciarias).

1. OBJETIVOS

1.1. OBJETIVO GENERAL

Proponer una alternativa para mitigar el impacto ambiental generado por la emisión de material particulado en vías terciarias, mediante el desarrollo de una estructura estabilizada de subrasante suelo-cemento-cal con incorporación de polvillo de llanta usada.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar la estabilización de subrasante en vías terciarias con dos (2) mezclas diferentes de cal y cemento con aplicación directa de polvillo de llantas usadas.
- Comparar el costo – beneficio ambiental por la reducción de material particulado en vías terciarias y la recuperación de la llanta de desecho.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. PROBLEMÁTICA CONTAMINACIÓN AMBIENTAL POR MATERIAL PARTICULADO EN VÍAS TERCIARIAS

La contaminación atmosférica por material particulado respirable, es una mezcla heterogénea de sustancias químicas y partículas de tamaño menor a 10 μm (PM10), a la que regularmente está expuesta la población, el cual puede causar problemas significativos en la salud, entre las que se incluyen mortalidad prematura, visitas permanentes al médico, ataques de asma, síntomas respiratorios y disminuciones de la función pulmonar [6].

En épocas de verano, cuando las carreteras están secas, existe la tendencia de aumentar la cantidad de polvo, debido a la tracción que ejercen las llantas de los vehículos. El polvo que se produce por vehículo depende del tamaño del mismo, su velocidad, peso de carga y del estado actual de la vía. Este material causa serias molestias a las personas y puede desencadenar en ellas enfermedades graves tales como la silicosis y la asbestosis. De igual forma, puede ocasionar molestias a las comunidades que se encuentran dentro del área de influencia de la vía. La generación de polvo suele ser una inconveniencia grande para los viajeros en temporada seca por dos razones: primero, el polvo es un peligro para usuarios del camino, pues obstaculiza la visión de conductores en ambos sentidos, lo cual incrementa la posibilidad de accidentes y segundo, ensucia tanto el interior de las cabinas de los vehículos como el exterior, lo que significa una reducción de la vida del motor [7].

La circulación intensa de vehículos y maquinaria sobre las vías no-pavimentadas, contribuye al aumento de la producción de polvo. La más eficaz medida para

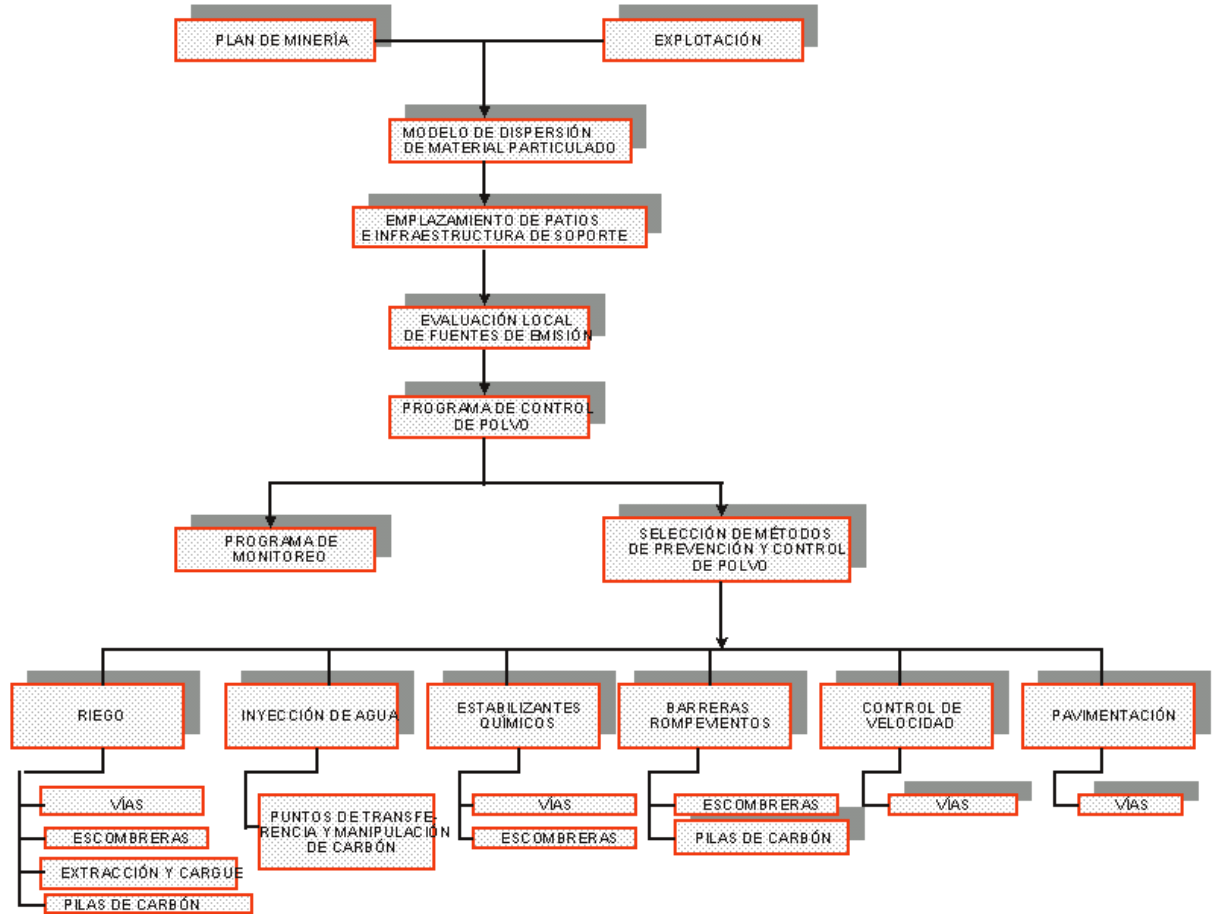
reducir la generación de polvo sobre estas vías, es el humedecimiento de la superficie de rodadura utilizando camiones tanque con agua o una mezcla de agua con productos reductores de polvo [1], sin embargo esta solución en muchas ocasiones no es posible, por la escases de agua, debido al agotamiento del recurso hídrico o a factores económicos que imposibilitan el desplazamiento de vehículos (camiones tanque), desde otros lugares para suplir las necesidades de agua en las zonas afectadas.

Estudios realizados en diferentes ciudades de España y Europa muestran al tráfico de vehículos como responsable de hasta un 50% de los niveles medios anuales de PM10 y PM2.5 (concentración en aire ambiente de partículas con un diámetro inferior a 10 y 2.5 μm , respectivamente, expresada en $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Puede dividirse a su vez en tres categorías de acuerdo a su tamaño, incluyendo una fracción gruesa (10 - 2.510 μm , deposición extratorácica), fina (0.125 μm ; deposición bronquial) y ultrafina (<0.1 μm ; deposición alveolar) [8].

2.2 MÉTODOS UTILIZADOS EN EL CONTROL DE MATERIAL PARTICULADO

La estabilización es el mejoramiento de un suelo por medio de un proceso físico o químico que se realiza para optimizar el comportamiento de las partículas que constituyen una vía. El Ministerio de Medio Ambiente recomienda diferentes métodos para la prevención y control de polvo (*Ver figura 1*).

Figura 1. Métodos sugeridos por el Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible para el control del polvo [9].



2.2.1 Sistemas de tratamiento en la estabilización de vías terciarias

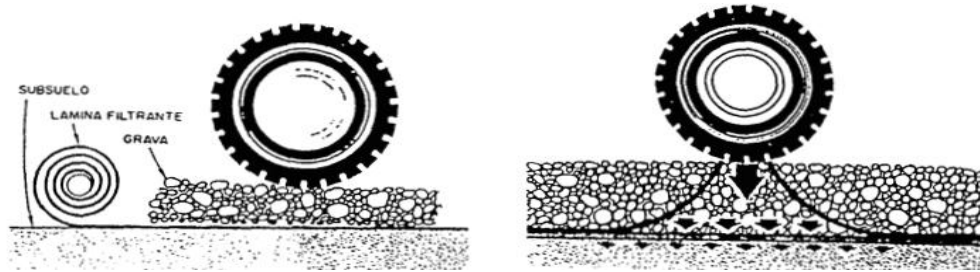
2.2.1.1 Riego con agua. Es un método bastante económico y efectivo, aunque en zonas áridas y en épocas de estiaje su implementación presenta serias restricciones por la disponibilidad de agua; sin embargo, para garantizar un suministro continuo de agua para riego, dentro de los proyectos se debe construir grandes reservorios de agua y mantener el equipo necesario [10].

2.2.1.2 Estabilizantes químicos: Los tres tipos de sustancias químicas empleadas son:

- Agentes humidificadores: Operan reduciendo la tensión superficial del agua, consiguiendo humedecer el polvo más fino, el de más difícil control. Su eficiencia se encuentra entre 40-84%.
- Sales higroscópicas: Atraen el vapor de agua de la atmósfera, retrasa la evaporación de sus soluciones con el agua y eleva la humedad de la capa superficial de las pistas. Además, el aumento de humedad incrementa la cohesión y compactación de los materiales de las vías. Las sales que más se utilizan son el cloruro sódico y el cloruro cálcico. Este último, se aplica bien en estado sólido, en forma de laminitas o en forma de solución concentrada, por lo general al 30%. Este tratamiento presenta una eficiencia de 60% aprox.
- Agentes creadores de costra superficial: Están constituidos por lignosulfonados, resinas sintéticas, compuestos vinílicos, polímeros sintéticos, etc. Se aplican en húmedo y tras su secado se consigue la formación de una costra que permite un buen control de polvo con una eficiencia cercana al 95% [10].

2.2.1.3 Láminas filtrantes sintéticas: Estas láminas, también llamadas geotextiles, se utilizan en la estabilización de suelos, drenaje, control de la erosión, etc. Ensayos realizados extendiendo estas láminas sobre las pistas y cubriéndolas con material granular grueso han demostrado que además de conseguirse un diseño óptimo y mantenimiento reducido se disminuye la cantidad total de partículas suspendidas en un 58% y de partículas respirables en casi un 46%, dependiendo de la naturaleza del material de subbase y de la capa de rodadura [10].

Figura 2. Pista de transporte con lámina filtrante [10].



Cada uno de estos productos actúa en el control del polvo según principios diferentes.

2.3 IMPACTO AMBIENTAL DE MATERIAL PARTICULADO

2.3.1. Aire. Las principales fuentes de emisión de material particulado son las vías y zonas erosionadas, las fuentes fijas de combustión, los procesos industriales y agrícolas, las fuentes móviles y las fuentes naturales [11]. El tamaño de las partículas difiere de acuerdo con las fuentes de emisión y se pueden caracterizar por sus propiedades físicas y químicas; mientras las propiedades físicas tienen un efecto sobre el transporte y el depósito de las partículas en el sistema respiratorio humano, la composición química determina el impacto de estas sobre la salud de las personas.

2.3.2 Agua. Es posible que se presenten efectos directos y adversos cuando se alteren los niveles de turbiedad y de sólidos suspendidos sobre la biota acuática, generando cambios en el hábitat que afectan las condiciones de vida, sin embargo esto depende de los niveles de adaptabilidad y de los parámetros de comportamiento de las especies involucradas.

2.3.3. Fauna. Se manifiesta principalmente por la desaparición de la cubierta vegetal, incidiendo directamente sobre el hábitat de las especies. El polvo tiende a reducir la visibilidad de los mamíferos, aves y demás especies, constituyendo un peligro para la vida de los mismos.

2.3.4. Flora. La vegetación se ve afectada seriamente, debido a la deposición de polvo sobre la superficie foliar, obstruyendo la capacidad de intercambio gaseoso y de captación lumínica, incidiendo directamente en la actividad fotosintética [7].

2.4. PROBLEMÁTICA POR DISPOSICION FINAL DE RESIDUOS

El incremento de la población en los últimos años y el desarrollo económico – industrial, han originado un continuo aumento en la generación de residuos sólidos; sin embargo su inadecuada gestión, ha provocado problemas ambientales graves que han conllevado a la contaminación de los recursos naturales agua, suelo, aire, además de los centros urbanos, afectando la salud pública de la población por la proliferación de vectores transmisores de enfermedades. Teniendo en cuenta la importancia que para el medio ambiente requiere el manejo adecuado de los residuos sólidos, es fundamental la implementación de una gestión integral de residuos sólidos, que comprenda etapas de reducción en el origen, aprovechamiento, tratamiento, transformación y disposición final controlada, con estrategias eficientes, que a su vez generen una valorización económica de los residuos.

2.4.1 Disposición final de llantas usadas. Cada año, millones de llantas son desechadas en todo el mundo ocasionado un problema grave de disposición final, debido a que no son biodegradables; se estima en más de doscientos (200) años la duración del proceso de descomposición. Las llantas retiradas de los vehículos de manera permanente, no son consideradas un residuo peligroso, ya que

prácticamente son productos inertes, sin embargo presentan inconvenientes para su disposición final porque deben ser enterradas, almacenadas, destruidas por incineración, quemadas a cielo abierto o dispuestas en rellenos sanitarios, atentando contra el ambiente, los recursos naturales y la salud pública. Las llantas se construyen reforzadas con fibras naturales y sintéticas (nylon, rayon y/o acero) por lo cual poseen gran resistencia y durabilidad aun después de convertirse en desechos [12].

Las llantas están compuestas de una gran cantidad de materiales, dependiendo del uso al cual se destinan, sus características especiales como resistencia a la carga, posibilidad de manejar alta presión, características de adherencia, entre otros (*Ver tabla 1*) [13].

Tabla 1. Composición típica de las llantas radiales

Material	Composición (%)	
	Automóviles	Camiones
Caucho natural	14	27
Caucho sintético	27	14
Negro de humo	28	28
Acero	14	15
Antioxidantes y rellenos	17	16

Fuente. GUÍA PARA EL MANEJO DE LLANTAS USADAS. Cámara de Comercio de Bogotá - CCB y Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente – DAMA, 2006.

2.4.2. Tecnologías para el aprovechamiento de las llantas en desuso. En la actualidad se utilizan diversos métodos para recuperar algunos de los materiales presentes en las llantas desechadas, y para destruir sus componentes peligrosos, a continuación se mencionan algunos de ellos:

2.4.2.1 Termólisis: Este proceso consiste básicamente en someter el material (llanta triturada) a un calentamiento en ausencia de oxígeno, provocando así la ruptura de los enlaces químicos, dando lugar a la aparición de cadenas cortas, medianas y largas de hidrocarburos, que constituirán la fase gaseosa y sólida [15]. Mediante el proceso de termólisis se produce una recuperación integral de todos los compuestos originales de la llanta, lo que supone un 100% de aprovechamiento de todos sus componentes originales. Se obtienen metales, carbones e hidrocarburos gaseosos, que pueden volver a las cadenas industriales, ya sea de producción u a otras actividades [14].

2.4.2.2 Pirolisis: El sistema involucra la degradación térmica en ausencia de oxígeno. Los productos primarios son los gases pirolíticos y aceites, entre otros, los aceites se trasladan a procesos adicionales para la fabricación de productos secundarios. Esta tecnología, plantea el problema técnico de la separación de gran cantidad de compuestos carbonados, ya que los productos obtenidos, se producen en cantidades mínimas, de tal forma que su recuperación y transporte hasta los centros de consumo no son económicamente viables [15].

2.4.2.3 Incineración: Proceso mediante el cual se produce la combustión de los materiales orgánicos de las llantas a temperaturas muy elevadas, en hornos con materiales refractarios de alta calidad. Genera calor que puede ser usado como energía, ya que se trata de un proceso exotérmico, sin embargo es un proceso costoso que presenta inconvenientes en las diferentes velocidades de combustión de los componentes y la necesidad de depuración de los residuos, por lo que es difícil de controlar, resultando contaminante. Con este método, los productos contaminantes que se producen en la combustión son perjudiciales para la salud humana, entre ellos el monóxido de carbono, hollín de xileno, óxidos de nitrógeno, dióxido de carbono, óxidos de zinc, benceno, fenoles, dióxido de azufre, óxidos de plomo, tolueno, entre otros. El hollín contiene cantidades importantes de hidrocarburos aromáticos policíclicos altamente cancerígenos. El zinc es

particularmente tóxico para la fauna acuática. Muchos de estos compuestos son solubles en el agua, por lo que pueden pasar a la cadena trófica y de ahí a los seres humanos [14].

2.4.2.4 Trituración Criogénica: El proceso consiste en congelar con nitrógeno líquido a las llantas y golpearlas para que puedan liberar la estructura metálica o textil de caucho, recogiendo este último en forma de polvo y el nitrógeno en forma de gas. Este método posee algunas desventajas, como la baja calidad de los productos obtenidos, requiere de instalaciones muy complejas, graves problemas de mantenimiento de la maquinaria y de su proceso, dificultad material y económica para purificar y separar el caucho y el metal entre sí y de los materiales textiles que forman el neumático.

2.4.2.5 Trituración Mecánica. Consiste en romper la llanta mecánicamente, en partículas pequeñas, obteniendo de esta manera la separación de sus compuestos. Por ser un proceso netamente mecánico los productos resultantes son de alta calidad y limpios de todo tipo de impurezas, facilitando la utilización de estos materiales en nuevos procesos y aplicaciones. La trituración con sistemas mecánicos, forma parte de uno de los métodos con mejores resultados de recuperación y rentabilización de los residuos de llantas en desuso.

2.5. IMPACTO AMBIENTAL DE LAS LLANTAS EN DESUSO.

2.5.1 Aire. La quema directa provoca graves problemas medioambientales, ya que produce emisión de gases que contienen partículas nocivas para el entorno [16]. Las emisiones que produce la quema de llantas a cielo abierto incluyen contaminantes tales como material particulado, monóxido de carbono (CO), óxidos de azufre (SOx), óxidos de nitrógeno (NOx), y compuestos orgánicos volátiles (COVs), entre otros.

Aproximadamente el 70% de las llantas son incineradas como combustible en hornos de producción panelera y de cemento, afectando el ambiente y la salud pública, a causa de las emisiones de contaminantes carcinogénicos y mutagénicos; en la actualidad el uso de llantas como energético tiene un agravante adicional y sobre el cual no se tienen estudios concretos, y es el efecto de la transferencia de componentes gaseosos a alimentos como la panela y su posterior absorción en los consumidores habituales del producto [13].

2.5.2 Agua. La disposición incontrolada de llantas sobre los vertederos o cuerpos de agua, provoca problemas ambientales, debido a la obstrucción del cauce natural de las corrientes hídricas, desencadenando en posibles inundaciones, que afectan la estabilidad de los terrenos, ocasionando pérdidas de cobertura vegetal, desplazamiento de fauna y contaminación de las corrientes hídricas.

2.5.3 Suelo. El depósito de este residuo en los rellenos sanitarios imposibilitan la compactación y ocasionan problemas de estabilidad por la degradación química parcial que sufren, generando inseguridad en los mismos. Los depósitos de llantas incrementan el riesgo potencial de incendio que en el caso de producirse, es de difícil extinción generando emisiones altamente contaminantes [17].

2.5.4 Paisaje. El almacenamiento de llantas, aparte de generar contaminación visual, también presenta múltiples inconvenientes como la proliferación de roedores o insectos y la reproducción de mosquitos, que transmiten por picadura enfermedades como fiebres y encefalitis, cuya tasa de reproducción llega a ser 4.000 veces mayor en el agua estancada de una llanta que en la naturaleza misma [16].

2.6. PROPUESTA DE SOLUCIÓN DE LA GENERACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO, CON EL USO DE LLANTAS, DENTRO DEL CONTEXTO DE ESTABILIZACIÓN DE VÍAS TERCIARIAS.

La propuesta de investigación inmersa en este trabajo, incluye considerar estas condiciones ambientales y sociales. Aspectos ambientales como, la generación de material particulado, la generación de residuos industriales, aspectos sociales como la afectación de la salud en la población y afectación de las condiciones del habitat. La solución de estabilización de rasantes en vías terciarias, con el uso de polvillo de llanta, resultante del tratamiento de llantas implicaba considerar las condiciones de estabilidad suelo cemento, usado como método experimental con buenos resultados, siendo implementado en algunos países como solución en obras civiles de vías terciarias y secundarias.

Se presenta a continuación dos posibilidades viables de implementar en campo para vías terciarias, por sus condiciones de acceso, factibilidad de disponibilidad de materiales y uso de equipos tradicionales.

Una vez logrado en laboratorio estas mezclas, la idea es determinar, condiciones de desgaste y generación de material de polvo, incorporando, el polvillo de llanta en dos eventos, sin temperatura y con temperatura. En la **Tabla 6** Listado y descripción de las pruebas a realizar con las mezclas señaladas, se muestra las posibilidades analizadas como viables a implementar.

2.7 PARÁMETROS BÁSICOS A EVALUAR.

Para lograr implementar la propuesta se considera la elaboración de briquetas de pruebas, en la cual se consideró necesario medir su masa y volumen inicial determinando su densidad. Se evalúa la viabilidad de programar el equipo que

logre simular la cantidad de pasadas de los vehículos, organizando las revoluciones por minutos del equipo de contacto, de la forma en que determine las cantidades de veces que es transitada la vía. Y finalmente tomar las condiciones de masa y volumen después de la prueba y valorar la masa y volumen perdidos.

3. MARCO LEGAL

3.1. DECRETO 948 DE JUNIO 5 DE 1995 - REGLAMENTO DE PROTECCIÓN Y CONTROL DE LA CALIDAD DEL AIRE.

3.1.1 Artículo 3. *Tipos de Contaminantes del Aire.* Son contaminantes de primer grado, aquellos que afectan la calidad del aire o el nivel de inmisión, tales como el ozono troposférico o smog fotoquímico y sus precursores, el monóxido de carbono, **el material particulado**, el dióxido de nitrógeno, el dióxido de azufre y el plomo. Son contaminantes tóxicos de primer grado aquellos que emitidos, bien sea en forma rutinaria o de manera accidental, pueden causar cáncer, enfermedades agudas o defectos de nacimiento y mutaciones genéticas.

3.1.2 Artículo 4. *Actividades Especialmente Controladas.* Sin perjuicio de sus facultades para ejercer controles sobre cualquier actividad contaminante, se considerarán como actividades, sujetas a prioritaria atención y control por parte de las autoridades ambientales, las siguientes:

e) La incineración o quema de sustancias, residuos y desechos tóxicos peligrosos;

3.1.3 Artículo 18. *Clasificación de Fuentes Contaminantes.* Las fuentes de contaminación atmosférica pueden ser:

- a. Fuentes Fijas: pueden ser puntuales, dispersas, o áreas-fuente.
- b. Fuentes Móviles: pueden ser: aéreas, terrestres, fluviales y marítimas.

3.1.4 Artículo 26. *Prohibición de incineración de llantas, baterías y otros elementos que produzcan tóxicos al aire.* Queda prohibida la quema abierta, o el uso como combustible en calderas u hornos en procesos industriales, de llantas, baterías, plásticos y otros elementos y desechos que emitan contaminantes tóxicos al aire.

3.2 RESOLUCIÓN 1457 DE JULIO 29 DE 2010 SISTEMAS DE RECOLECCIÓN SELECTIVA, Y GESTIÓN AMBIENTAL DE LLANTAS USADAS

3.2.1 Artículo 1. La presente resolución tiene por objeto establecer a cargo de los productores de llantas que se comercializan en el país, la obligación de formular, presentar e implementar los Sistemas de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Llantas Usadas, con el propósito de prevenir y controlar la degradación del ambiente.

3.2.2 Artículo 13. *Obligaciones de los distribuidores y comercializadores.* Para efectos de los Sistemas de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Llantas Usadas, son obligaciones de los distribuidores y comercializadores las siguientes:

- a) Formar parte de los Sistemas de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Llantas Usadas que establezcan los productores y participar en la implementación de dichos Sistemas;
- b) Aceptar la devolución de las llantas usadas, sin cargo alguno para el consumidor, cuando suministren para la venta llantas y hagan parte del Sistema de recolección y gestión;
- c) Informar a los consumidores sobre los puntos de recolección de estos residuos, disponibles en sus puntos de venta o puntos de comercialización;

- d) Disponer, sin costo alguno para los productores, un espacio para la ubicación de los puntos de recolección que disponga el productor para la entrega y recolección de las llantas usadas por parte de los consumidores;
- e) Garantizar la seguridad de los puntos de recolección que se ubiquen dentro de sus instalaciones para la entrega y recolección de llantas usadas;
- f) Apoyar al productor y/o a las autoridades en la realización y/o difusión de campañas de información pública sobre los Sistemas de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Llantas Usadas;
- g) Diligenciar y suministrar las planillas y documentos dispuestos por los productores para el control de llantas usadas que se recojan dentro de los Sistemas de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Llantas Usadas.

3.2.3 Artículo 14. *Obligaciones de los consumidores.* Para efectos de aplicación de los Sistemas de Recolección Selectiva y Gestión Ambiental de Llantas Usadas, son obligaciones de los consumidores las siguientes:

- a) Retornar o entregar las llantas usadas en los puntos de recolección establecidos por los productores.
- b) Seguir las instrucciones de manejo seguro suministradas por los productores de llantas.

3.2.4. Artículo 16. *Prohibiciones.* Se prohíbe:

- a) El abandono o eliminación incontrolada de llantas usadas en todo el territorio nacional;
- b) Disponer llantas usadas en los rellenos sanitarios;
- c) Enterrar llantas usadas;
- d) Acumular llantas usadas a cielo abierto;
- e) Abandonar llantas usadas en el espacio público;
- f) Quemar llantas a cielo abierto o cerrado de manera incontrolada;

- g) Utilizar las llantas usadas como combustible sin el cumplimiento de lo establecido en la Resolución 1488 de 2003, o la norma que la modifique o sustituya.

3.3. NORMA TÉCNICA COLOMBIANA GTC 24 GESTIÓN AMBIENTAL, RESIDUOS SOLIDOS, SEPARACIÓN EN LA FUENTE

Tabla 2. Tipos de residuos para la separación en la fuente.

RESIDUOS ESPECIALES	<ul style="list-style-type: none">- Escombros- <u>Llantas usadas</u>- Colchones- Residuos de gran volumen: electrodomésticos, equipos y muebles
--------------------------------	---

4. METODOLOGÍA

Partiendo de la idea general de la monografía, se plantea realizar una serie de mezclas para el desarrollo de una estructura estabilizada de subrasante suelo-cemento-cal con incorporación de polvillo de llanta usada. Inicialmente, se realizó una revisión bibliográfica consultando la aplicación del polvillo de llanta en la ingeniería civil, evaluando su aplicación en la estabilización de suelos; donde se resalta su uso en mezclas de pavimentación de asfalto y hormigón de cemento portland [18].

4.1 MATERIALES Y FABRICACIÓN DE BRIQUETAS

Las principales materias primas utilizadas en la fabricación de las muestras son las siguientes:

- *Polvillo de llanta*: El caucho pulverizado son partículas de caucho entre malla 10 y malla 30, libres de acero y fibra. Se utiliza como sustrato para jardinería, insumo para regenerar caucho, frenos de vehículos, suelas de zapatos, entre otros. Producto derivado del reciclaje de llantas. Se le adquirió a la empresa Mundo Limpio, C.I. Parque Ambiental Mundo Limpio S.A., Cra. 43ª #16 sur en Cundinamarca [19].

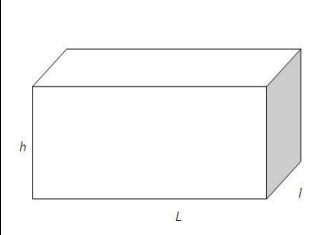
Figura 3. Llanta pulverizada de la empresa Mundo Limpio.



- *Cemento:* Cemento gris Ultracem tipo 1, Cumple con las normas NTC 121 Tipo I y ASTM C1157 Tipo GU.
- *Cal:* Cal viva e hidratada industrial Procecal S.A., gránulos blancos y heterogéneos, consistentes especialmente de Oxido de Calcio con otros óxidos [20].

En la tabla 3 se describen las dimensiones con las cuales se elaboraron las briquetas.

Tabla 3. Dimensiones utilizadas en la elaboración de briquetas.

Dimensiones Briqueta	
Alto (h): 2,5 cm	
Largo (L): 9 cm	
Ancho (l): 4,5 cm	

Las briquetas de ensayo fueron preparadas haciendo que cada una tenga el mismo volumen y las proporciones indicadas en la tabla 3. El contenido de polvillo de llanta, cemento y cal usado está determinado con base en la revisión bibliográfica realizada.

Se prepararon cuatro (4) mezclas diferentes para analizar, además, se realizaron dos (2) mezclas consideradas el blanco de la prueba 3, 3R, 4 y 4R, sin adición de cemento ni cal. Así pues, para los análisis de desgaste por rodamiento se realizaron doce (12) briquetas en total. Para cada muestra se necesitaron aproximadamente 140 g de mezcla, las cuales se moldearon como se observa en la tabla 3; seis (6) se secaron a temperatura ambiente durante cuatro días y las otras seis (6) se secaron en el horno con el siguiente método: 25°C - 115°C (15 min) y 115°C – 150°C (15 min).

4.2 RELACIÓN DE MATERIALES PARA MEZCLAS ELABORADAS

En la tabla 4 y 5 se describe las proporciones que se utilizaron en las mezclas para la prueba preliminar de abrasión por desgaste, donde se evaluó la proporción de polvo de llanta, tipo de secado de las muestras y la calidad de la mitigación de material particulado con el desgaste por rodamiento.

En las briquetas elaboradas se evaluaron dos porcentajes de llanta pulverizada 10% y 20 %. Según B.S. Thomas [21] un porcentaje de 10% de neumáticos de goma muestra mejores propiedades de resistencia y seguridad contra la permeabilidad al agua. La mezcla de hormigón con una combinación de 40% de escoria de cobre y 10% de los neumáticos de goma se puede recomendar para pavimentos, estructurales y obras no estructurales [21].

En la literatura se encontró que el uso de partículas de caucho aumenta la capacidad de deformación y son capaces de absorber grandes cantidades de energía después de una carga máxima y antes de un fallo en la estructura final. También, mayor ductilidad que tiene la capacidad de soportar cargas después de las fallas [22].

En el tratamiento de suelos se puede utilizar cal viva (óxido de calcio – CaO), cal hidratada (hidróxido de calcio – Ca[OH]₂) o una lechada de cal. Según Ing. SOFIA FIGUEROA, (MsC En Docencia de la Universidad de La Salle, Esp), en la estabilización con cal uno de los aspectos que se logra controlar es el contenido de agua en suelos muy húmedos de tal manera que sean manejables y se logren mejores condiciones de compactibilidad. Al mezclar el suelo con la cal se mejora la condición plástica del mismo, la estabilidad volumétrica, la reducción de permeabilidad y por ende su capacidad de soporte. Los porcentajes recomendables para suelos estabilizados con cal o cal y arena, es común dosificar entre 3 y 5 % en peso seco del suelo [3]. En esta investigación se trabajó con un 5% en peso de cal.

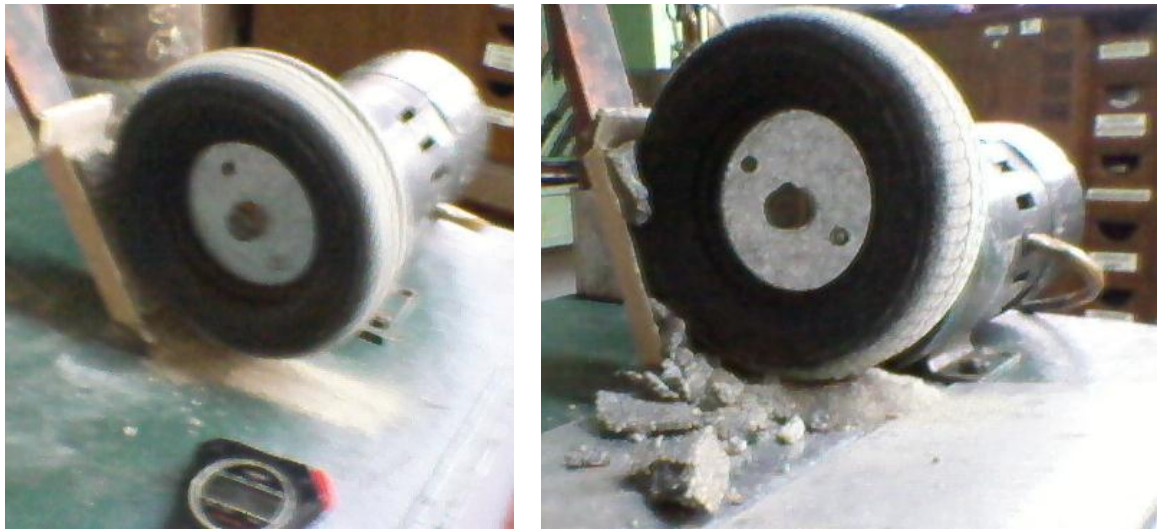
La estabilización con cemento se emplea para aumentar la resistencia del suelo, así mismo, incrementar las cargas de tránsito y obtener mezclas con un mejor comportamiento ante la erosión y los cambios abruptos de temperatura [3]. Los requerimientos de cemento para diferentes tipos de suelos se encuentran entre 5% - 10% en peso seco [23]. Las mezclas realizadas se trabajaron un porcentaje de 10% de cemento. En la práctica es común la utilización de pequeñas cantidades de cemento junto con la cal para aumentar la resistencia de los suelos.

4.3 DESCRIPCIÓN PRUEBA DE DESGASTE POR RODAMIENTO

La prueba de desgaste por rodamiento en seco con una rueda (*Figura 4*) implica la abrasión de una muestra de ensayo con un tamaño y composición controlada. Esta muestra se presiona contra la rueda que gira a una fuerza determinada y raspa la superficie de ensayo por medio de un brazo de palanca [24]. La rotación de la rueda es controlada por un motor. La duración de la prueba y la fuerza aplicada por el brazo de palanca se observa a continuación:

- Rotación del neumático: 14 rpm
- Diámetro de la rueda: 16 cm
- Fuerza aplicada a la muestra: 4,802 N
- Tiempo de la prueba: 6 min.
- Velocidad de rueda: 0,841 km/h

Figura 4. Montaje de la prueba de desgaste por rodamiento en seco con una rueda.



Las muestras fueron pesadas antes y después de la prueba y se registró la pérdida de masa. Es necesario convertir la pérdida de masa a la pérdida de volumen, debido a las diferencias en la densidad de los materiales. Abrasión se reporta como la pérdida de volumen por el procedimiento especificado.

Tabla 4. Mezclas realizadas para pruebas de desgaste por rodamiento.

N° muestra	% Tierra	% polvillo de llanta	% Cemento	% Cal	Agua (ml)	Peso briqueta (g)
1	80	10	10	--	50	143,51
1R						140,75
2	70	20	10	--	50	133,78
2R						129,38
3 Blanco	90	10	--	--	50	132,03
3R Blanco						122,56
4 Blanco	80	20	--	--	50	135,88
4R Blanco						130,73
5	75	10	10	5	50	136,23
5R						142,85
6	65	20	10	5	50	137,33
6R						144,08

Tabla 5. Listado y descripción de las pruebas a realizadas con las mezclas señaladas.

PRUEBAS PARA ESTABILIZACION DE VIAS CON EL REUSO DE LLANTA MOLIDA						
Objetivo General: Eliminación de Material Particulado en Vías Terciarias, mediante el reúso de llantas convertidas en polvillo.						
TIPOS DE MEZCLAS	% TIERRA	% LLANTA POLVILLO	% CEMENTO	% CAL	RESULTADOS A EVALUAR	PRUEBAS A REALIZAR
1. Blanco: Tierra con polvillo de llanta.	90 80	10 20	--	--	1. Proporción de Polvo de llanta. 2. Prueba con secado a T amb y a T 150 °C 3. Calidad de la mitigación de material Particulado con prueba de desgaste por rodamiento.	2 2
2. Estabilización de subrasante con cemento y aplicación directa de polvillo de llanta.	80 70	10 20	10 10	--	1. Costos de materiales. 2. Proporción de Polvo de llanta. 3. Prueba con secado a T amb y a T 150 °C 4. Calidad de la mitigación de material Particulado con prueba de desgaste por rodamiento.	2 2
3. Estabilización con cemento – cal y aplicación directa de polvillo de llanta.	75 65	10 20	10 10	5 5	1. Costos de materiales. 2. Proporción de Polvo de llanta. 3. Prueba con secado a T amb y a T 150 °C 4. Calidad de la mitigación de material Particulado con prueba de desgaste por rodamiento.	2 2
TOTAL DE PRUEBAS A REALIZAR SIN CALENTAMIENTO						6
TOTAL DE PRUEBAS A REALIZAR INCLUYENDO DUPLICADO CON TRATAMIENTO TERMICO						12

4.4 DESCRIPCIÓN ANÁLISIS DE TAMAÑO DE PARTÍCULAS POR TAMIZADO

El ensayo trata de separar una muestra de agregado seco de masa conocida, a través de una serie de tamices de aberturas progresivamente menores, con el objeto de determinar los tamaños de las partículas.

La prueba se realizó para el residuo obtenido por las briquetas que completaron el tiempo de la prueba de desgaste (*Tabla 6 y 7*).

Tabla 6. Residuo generado por las briquetas que completaron los 6 min en la prueba de desgaste.

BRIQUETA	1R	4R	5R	1	2	3	4	5
MASA INICIAL (g)	140,75	130,73	142,85	143,51	133,78	132,03	135,88	136,23
MASA PERDIDA (g)	8,71	49,39	25,76	44,20	13,78	35,47	53,61	48,40

Durante la prueba se trabajaron con los dos tamices de menor diámetro a disponibilidad, malla 100 y 120 (*Figura 5*); se pesó el residuo obtenido y se llevó a los tamices, los cuales se agitaron en el equipo durante 2 minutos.

Luego, se pesaron las mallas y el fondo para obtener las fracciones separadas de cada residuo.

Figura 5. Prueba de tamizado realizada a residuo de las briquetas.



5. DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se realizó un análisis de resultados de las pruebas realizadas en el laboratorio, además de un breve estudio costo beneficio ambiental sobre la problemática evaluada. Se procedió a determinar la viabilidad de la inclusión del polvillo de llanta usada en la estabilización de subrasante como alternativa para controlar el material particulado en vías terciarias.

5.1 PRUEBA DE DESGASTE POR RODAMIENTO

Los resultados obtenidos en la prueba se pueden observar en la tabla 7, donde se destaca en color rosa las muestras de ensayo que se destruyeron antes de terminar el tiempo de la prueba de desgaste y cabe resaltar que la mezcla seis (6) se destruyó con los dos tratamientos de temperatura que se manejaron.

Se observa que la mitad de las briquetas secadas a temperatura ambiente durante cuatro (4) días se destruyeron en la prueba de desgaste, lo que indica que este tratamiento no logra estabilizar un 50% de las mezclas elaboradas; en cambio el tratamiento térmico en el horno si logró estabilizar a cinco (5) de las seis (6) mezclas trabajadas (Gráfica 1).

Gráfica 1. Comparación de % volumen perdido en la prueba de desgaste.

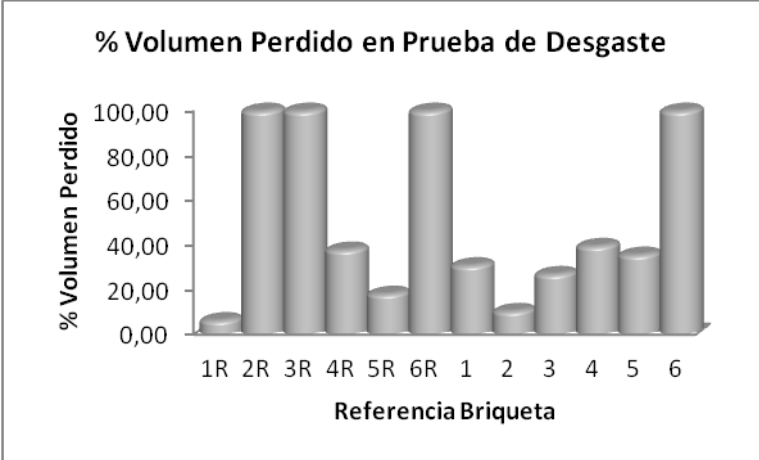


Tabla 7. Resultados obtenidos en la prueba de desgaste por rodamiento.

REFERENCIA BRIQUETA	BRIQUETAS SIN TRATAMIENTO TÉRMICO ⁽¹⁾						BRIQUETAS CON TRATAMIENTO TÉRMICO ⁽²⁾					
	1R	2R	3R	4R	5R	6R	1	2	3	4	5	6
MASA INICIAL (g)	140,75	129,38	122,56	130,73	142,85	144,08	143,51	133,78	132,03	135,88	136,23	137,33
VOLUMEN INICIAL (cm³)	101,25											
DENSIDAD (g/cm³)	1,39	1,28	1,21	1,29	1,41	1,42	1,42	1,32	1,30	1,34	1,35	1,36
RPM DE LA RUEDA	14,00											
TIEMPO (min)	6,00	4,25	5,36	6,00	6,00	2,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	1,50
MASA FINAL (g)	132,04	0,00	0,00	81,34	117,09	0,00	99,31	120,00	96,56	82,27	87,83	0,00
MASA PERDIDA (g)	8,71	129,38	122,56	49,39	25,76	144,08	44,20	13,78	35,47	53,61	48,40	137,33
VOLUMEN PERDIDO (cm³)	6,27	101,25	101,25	38,25	18,26	101,25	31,18	10,43	27,20	39,95	35,97	101,25
% VOLUMEN PERDIDO	6,19	100,00	100,00	37,78	18,03	100,00	30,80	10,30	26,87	39,45	35,53	100,00

(1) Briquetas que se secaron durante 4 días a temperatura ambiente.

(2) Briquetas que se secaron en el horno desde 25°C – 115°C (15 min) y luego de 115°C – 150°C (15 min).

Briquetas que en el tiempo indicado se destruyeron totalmente.

En la gráfica 1 se comparan los porcentajes de volumen perdidos en el ensayo por cada muestra analizada; en este caso se resalta que las briquetas trabajadas con tratamiento térmico en el horno en su mayoría terminaron la prueba (Ver figura 6), pero perdieron un alto porcentaje de volumen; en cambio, las briquetas trabajadas a temperatura ambiente que lograron terminar la prueba de desgaste, presentaron mejores resultados (Figura 7). Se observa que las muestras de referencia 1R y 2 presentaron la menor pérdida de volumen 6,19% y 10,3% respectivamente. Es importante resaltar, que a pesar que en las referencias R solo el 50% terminó la prueba, la 1R fue la mezcla que presentó menor pérdida de las doce (12) muestras analizadas y en el tratamiento térmico no se requirió agregar energía adicional, lo que reduce los costos de elaboración.

Figura 6. Briqueta con tratamiento térmico antes y después de la prueba de desgaste.



Este resultado permite concluir que en la estabilización de subrasante es viable la inclusión del polvillo de llanta usada y cemento, mostrando que el 10% de cemento ayuda a estabilizar las mezclas. Se resalta que las muestras referenciadas como blanco 3, 4 y 4R elaboradas únicamente con arena y llanta pulverizada presentaron pérdidas de volumen altos y la muestra 3R no alcanzó los seis (6) minutos de la prueba de desgaste.

Figura 7. Briquetas sin tratamiento térmico, lado izquierdo 4R y lado derecho 1R.



5.2 ANÁLISIS DE TAMAÑO DE PARTÍCULAS POR TAMIZADO

El análisis granulométrico tiene por objeto la determinación cuantitativa de la distribución de tamaños de partículas de suelo. En el ensayo se utilizaron las siguientes mallas:

- Malla N° 100: diámetro de abertura 149 μm
- Malla N° 120: diámetro de abertura 125 μm

Para la elaboración de esta prueba se tuvieron en cuenta las briquetas que alcanzaron los seis (6) minutos en la prueba de desgaste por rodamiento, descartando las que sufrieron rompimiento antes del tiempo estimado.

A continuación se presenta la Tabla 8 que contiene los datos básicos tomados en laboratorio y los valores promedio calculados para cada porcentaje de retención por tamaño de malla trabajada.

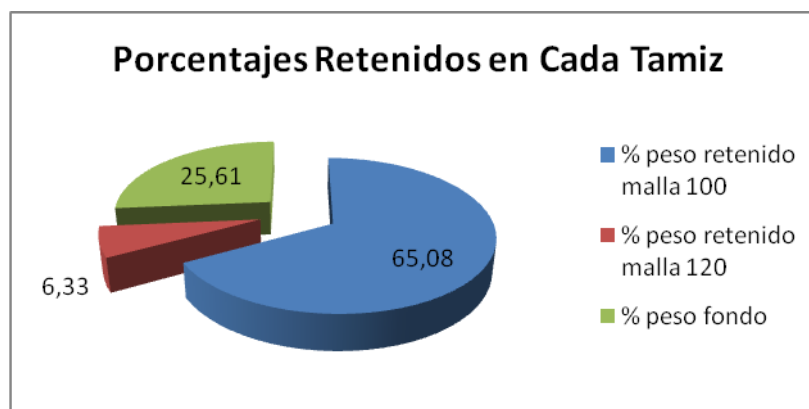
Tabla 8. Resultados obtenidos en la prueba Tamizado.

Ref. Muestra	Masa (g) inicial muestra	Masa (g) retenido malla 100	Masa (g) retenido malla 120	Masa (g) retenido fondo	% peso retenido malla 100	% peso retenido malla 120	% peso retenido fondo	Porcentaje total de muestra
1	44,12	27,83	2,81	11,70	63,08	6,37	26,52	95,97
2	22,60	14,52	1,53	5,75	64,25	6,77	25,44	96,46
3	35,40	23,28	2,39	8,54	65,76	6,75	24,12	96,64
4	53,85	37,76	3,58	11,41	70,12	6,65	21,19	97,96
5	48,56	30,46	3,99	12,97	62,73	8,22	26,71	97,65
1R	13,81	8,67	0,44	3,92	62,78	3,19	28,39	94,35
4R	69,87	49,33	4,18	15,45	70,60	5,98	22,11	98,70
5R	42,77	26,22	2,86	12,99	61,30	6,69	30,37	98,36
PROMEDIO					65,08	6,33	25,61	97,01

Se observa que más del 70% de los residuos obtenidos en la prueba de desgaste por cada mezcla es de un diámetro mayor a 125 μm , todos los residuos presentaron porcentajes de retención muy cercanos en la malla N°100 y malla N° 120. En esta ocasión no se logró trabajar con tamices de menor diámetro a 125 μm , debido a que en el laboratorio solo se contaba hasta la malla N° 120.

En el porcentaje total de la muestra se encuentran pérdidas de material al sacar el retenido de cada tamiz de un valor cercano al 3% de pérdida de peso.

Gráfica 2. Comparación de los porcentajes retenidos en cada tamiz.



Como se puede observar en la Gráfica 2 más de la cuarta parte (25,61%) de la masa de residuo recogido posee un diámetro inferior a 125 μm , lo cual es considerado un porcentaje alto, teniendo en cuenta que el objeto del análisis es tratar de cuantificar los tamaños de partícula de los residuos obtenidos en la prueba anterior, sin embargo cabe resaltar que al no contar con un diámetro inferior de malla, no es posible cuantificar la pérdida y los daños ocasionados a la salud humana.

5.3 COSTO – BENEFICIO AMBIENTAL POR LA REDUCCIÓN DE MATERIAL PARTICULADO CON LA RECUPERACIÓN DE LA LLANTA USADA

Es importante considerar que el manejo de polvo en vías terciarias, tiene diferentes tratamientos, pero el más utilizado es el riego con agua, esto implica el alquiler de carrotanques, la disponibilidad del recurso hídrico y el desplazamiento de los vehículos hasta el sitio de cargue; sin embargo en algunos escenarios se cuenta con concesión de aguas (superficiales o subterráneas) otorgada por la Autoridad Ambiental dentro de su jurisdicción, reduciendo los costos diarios de operación por kilómetro de vía, no obstante, existen zonas donde el acceso al recurso hídrico es de difícil adquisición, debido al agotamiento del recurso sobre todo en épocas de estiaje, siendo necesario conseguirlo de otras fuentes de abastecimiento como son, los acueductos municipales o veredales que cuenten con concesión de aguas debidamente legalizada ante la Autoridad Ambiental competente, esto incrementa los costos diarios de riego por kilómetro, teniendo en cuenta el alquiler del vehículo – carrotanque, el desplazamiento del vehículo hasta el lugar de adquisición del agua, el costo del vehículo por cada viaje y la cantidad de agua requerida para suplir las necesidades de riego. Adicional a esto, se debe tener en cuenta el problema social que esto genera a las comunidades asentadas en el área de influencia. A continuación se describen los costos de operación para hacer riego a 4 km de vía, utilizando agua y agua más aditivo.

Tabla 9. Costos para riego con agua de 4 km de vía terciaria.

CANT.*	DESCRIPCIÓN	VALOR EN PESOS	VALOR TOTAL
360	Alquiler del vehículo carrotanque	\$ 800.000	\$288'000.000
360	Adquisición del agua (80 barriles)	\$ 120.000	\$43'200.000
	--	--	\$331'200.000

*Número de riegos realizados por día (4) durante un periodo de 3 meses.

Los valores expuestos anteriormente fueron suministrados por una empresa operadora del sector petrolero. Los costos estimados se tuvieron en cuenta para vehículos – carrotanques con capacidad de 80 barriles. En la tabla 9 podemos observar que el costo total para riego de un tramo de vía de 4 km es de \$ 7'360.000 pesos M/CTE, contemplado el alquiler del vehículo – carrotanque con su capacidad total de carga (agua) sin desplazamientos, sin embargo existe un gasto adicional que incrementa los costos de operación y se encuentra relacionado con el desplazamiento del carrotanque hasta el sitio de adquisición del recurso hídrico, contando con que en la mayoría de los casos, se encuentran retirados de la zona; este costo varía dependiendo de la cantidad de desplazamientos diarios y las distancias recorridas.

Tabla 10. Costos para riego con agua + aditivo de 4 km de vía terciaria.


CANT. km	DESCRIPCIÓN	VALOR EN PESOS	VALOR TOTAL
4	Alquiler de vehículo – carrotanque, Adquisición de agua + aditivo	\$ 20,000.000	\$80'000.000
	--	--	\$80'000.000

La tabla 10 muestra que los costos para el riego de un tramo de vía de 4 km es de \$ 80.000.000 pesos M/CTE, esto contempla el alquiler del vehículo carrotanque con su capacidad total de carga, tanto de agua como de aditivo, la proporción utilizada es 1:1 y la mezcla se realiza directamente en la zona de

riego. El tiempo de duración estimado es de 3 meses y se utiliza en épocas de verano, porque las lluvias retiran el aditivo de la superficie.

A continuación se analiza el costo generado para la estabilización de 4 km de vía, utilizando la mezcla de menor desgaste 1R; se trabajará un espesor recomendado [21] y un ancho de calzada de 6 m sugerido por el INVIAS para carreteras terciarias, las dimensiones se observan en la siguiente tabla 11:

Tabla 11. Dimensiones para generar costo de 4 km de carretera.

Dimensiones Suelo estabilizado	
Espesor (h): 0,15 m	
Largo (L): 4000 m	
Ancho (l): 6 m	

De acuerdo con la densidad de la mezcla que presentó mejor resultado (1R), se va a estimar el costo necesario para una estructura de 24000 km² de suelo con un espesor de 0,15 m; teniendo en cuenta que con la mezcla 1R, no se requiere aplicación de energía para su secado, se debe aclarar que el secado se realiza en una superficie abierta a temperatura ambiente. El tramo estimado de carretera con el cual se realizó el cálculo de costos es de 4 km, debido a que fueron los datos suministrados por una empresa del sector petrolero.

En la tabla 12 se observan los materiales para la elaboración de la estructura estabilizada de 24000 m² y los precios unitarios por cantidad estimada, los valores son tomados de las cotizaciones solicitadas a tres ferreterías en la ciudad de Bucaramanga. La tierra para la mezcla se obtiene de la vía que pretende ser estabilizada.

Tabla 12. Costos para la estabilización de 24000 m² de suelo en vías terciarias.

MATERIA PRIMA PARA MEZCLA 1R	CANT.	VALOR EN PESOS	CANTIDAD NECESITADA 2400 km² DE ÁREA	VALOR
Polvillo de llanta 10%	1 Ton	\$ 1'360.000	500,4 Ton	\$680'544.000
Cemento 10%	1 Ton	\$ 480.000	500,4 Ton	\$240'192.000
Agua	1 m ³	\$ 1.500	834 m ³	\$1'251.000
Tierra 80%	--	--	4003,2 Ton	--
Masa total superficie	--	--	5004 Ton	\$921'987.600

Como se observa en la tabla 12 el costo por estabilizar 24000 m² de suelo, se encuentra en un valor de \$ 921'987.600 pesos M/CTE aproximadamente, teniendo en cuenta que los cálculos se realizaron con agua potable, suministrada por el acueducto de la ciudad de Bucaramanga; sin embargo se debe tener presente que para la elaboración de una vía con pavimento asfáltico se tiene un costo en promedio de \$ 6'913.978.500 pesos M/CTE por km, teniendo en cuenta que este valor incluye la mano de obra de la construcción, puentes y túneles adjudicados [27].

La elaboración de la superficie de subrasante con el polvillo de llanta para la estabilización del suelo para el control de polvo en las carreteras terciarias genera beneficios adicionales, entre ellos se encuentran:

- Materias primas a costos bajos.
- Utilización de un residuo especial como lo es la llanta en desuso, en la elaboración de la superficie de estabilización.
- Reducción de la logística necesaria para solucionar la problemática de abastecimiento de agua y material particulado, evitando de esta manera inconvenientes con las comunidades.

Además de un alto número de beneficios para los directamente afectados en estas zonas. A continuación se mencionan algunos:

- Incrementar el desarrollo de nuevas actividades productivas.
- Reducir los efectos en la salud de las poblaciones cercanas a las vías.
- Garantizar el desarrollo normal de la vegetación en el área de influencia.
- Disminuir los costos de transporte.
- Consolidar la soberanía nacional.
- Fomentar la integración regional, entre otros.

Y los beneficiarios directos de este tipo de proyectos son:

- Los habitantes de las comunidades cercanas a las vías.
- La vegetación y animales que se encuentran en el área de influencia.
- Los conductores que circulan por la carretera.
- Las empresas transportadoras y sus clientes.
- Las autoridades del área.

Se debe tener presente que la estabilización del suelo con este tipo de mezclas, van a tener un impacto ambiental sobre el suelo, ya que se reduce su capacidad de absorción, pero también, se controlará el material particulado y los efectos generados por la lluvia en este tipo de vías.

La revisión de varios estudios sugiere que el uso de materiales reciclados tiene un impacto positivo a través de diferentes aspectos. Esto incluye los beneficios en la mejora de sostenibilidad de la industria petrolera, construcción, minera y etc, incluyendo la reducción de costos, proporcionando soluciones a la contaminación del medio ambiente y la reducción de la necesidad de recursos naturales [26].

6. CONCLUSIONES

El secado a temperatura ambiente logra mejorar al 50 % de las referencias trabajadas, a diferencia del tratamiento térmico que estabiliza un 83,3%, no obstante el tratamiento térmico aumenta la pérdida de volumen durante la prueba de rodamiento como se observa en las referencias 1 - 1R, 4 - 4R, 5 - 5R.

Realizando una comparación de los resultados obtenidos en la prueba de desgaste por rodamiento, se observó que las mezclas que presentaron mayor resistencia al desgaste de la rueda y a la fuerza 4,802 N aplicada fueron las referencias 1R y 2, las cuales perdieron un porcentaje en volumen de 6,19% y 10,3% respectivamente, con la ventaja que la referencia 1R presentó una pérdida menor de volumen y además, no requirió de energía adicional para su secado, reduciendo los costos en su fabricación.

En la estabilización de subrasante es viable la inclusión del polvillo de llanta usada y cemento, debido a que las muestras referenciadas como blanco 3, 3R, 4 y 4R elaboradas únicamente con arena y llanta pulverizada, presentaron pérdidas de volumen altos. Se destaca que 10% de cemento mejora la estabilización de las mezclas con polvillo de llanta, permitiendo una baja pérdida de volumen. A diferencia del 5% de cal, que generó un aumento en la pérdida de volumen durante la prueba de desgaste.

Se observó que aproximadamente el 25% del residuo generado por todas las briquetas que terminaron la prueba de desgaste, tienen un tamaño de partícula menor a 125 μm y el 65% un diámetro mayor a 149 μm .

La elaboración de una estructura estabilizada de subrasante suelo-cemento con incorporación de polvillo de llanta usada, a pesar de tener un costo

representativo, se expone como una opción ante la problemática ambiental de emisión de material particulado además del tratamiento de un residuo sólido de difícil disposición, esto debido a que la materia prima es de fácil adquisición y ambientalmente sostenible, superando los limitantes más importantes en el diseño y ejecución de vías. Que a su vez mejora la calidad de vida de las comunidades aledañas a las zonas de influencia del desarrollo de los proyectos.

El uso de la llanta usada en este tipo de proyectos genera una alternativa ante la problemática ambiental actual generada por la mala disposición de este residuo, encontrando aplicaciones tanto económicas como ecológicas para la industria.

7. RECOMENDACIONES

Realizar una prueba a gran escala sobre una vía terciaria que presente consecuencias de tipo ambiental por la emisión de material particulado, tomando como referencia las muestras 1R y 2 que presentaron una mejor estabilidad al desgaste de la rueda y a la fuerza 4,802 N aplicada, determinando de esta manera el tiempo de vida útil del proyecto y así mismo el costo – beneficio ambiental real de su implementación.

Realizar un estudio completo para diferentes tipos de suelo que requieran estabilización, analizando los beneficios de utilizar un porcentaje de llanta como materia prima y su contribución a la problemática ambiental generada por la emisión de material particulado sobre las vías terciarias.

Motivar el desarrollo de investigaciones que incorporen el tratamiento, manipulación, reciclaje, reutilización de llantas fuera de uso, con el fin de obtener productos o subproductos aplicados a la industria.

Continuar con la presente investigación, con el fin de indagar sobre los beneficios ambientales, económicos y ecológicos de utilizar polvillo de llanta en la minimización del material particulado sobre las vías destapadas o erosionadas.

Incluir dentro de la Legislación Colombiana un porcentaje de materia prima de llantas en desuso (triturada o en polvillo), para el desarrollo de proyectos de construcción vial, siempre y cuando sea técnico y económicamente viable, con el fin de contribuir con el impacto ambiental ocasionado por el incremento e inadecuada disposición de este residuo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Consorcio Prime Engenharia, Asociación Potlatch. EEIA y Evaluación Ambiental Estratégica del Corredor Santa Cruz. Puerto Suarez, 2010. Museo Noel Kempff Mercado.
2. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Calidad del Aire [online]. Madrid (España), 2012 [Citado 5 abril de 2014]. Disponible en Web Ayuntamiento de Madrid: <<http://www.mambiente.munimadrid.es/opencms/opencms/calair/ContaAtmosferica/portadilla.html>>.
3. FIGUEROA, Sofia. Estabilización de Suelos con Cal. 2010. Maestría en Vías Terrestres.
4. MARIN, B. producción de carbones activados a partir de neumáticos usados y su aplicación en procesos de adsorción. 2012.
5. MARÍN, Beatriz. En favor del medio ambiente: de llanta vieja a carbón activado. 2012.
6. CASTRO, Henry. Caracterización fisicoquímica de material particulado y Aplicación de modelos receptor-fuente en el área Metropolitana de Bucaramanga. Bucaramanga, 2010. 7-9 p. Corporación Autónoma para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga.
7. Ministerio de Minas y Energía, Ministerio del Medio Ambiente. Manejo de Impactos Ambientales: guía minero ambiental de explotación. 2001. 13-20 p. MMA & MINERCOL.
8. Fundación Biodiversidad del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Impactos sobre la salud del sector transporte [online]. Madrid (España), 2014, [Citado abril 1 de 2014]. Disponible en web ECODES: <<http://www.ecodes.org/salud-calidad-aire/201302176138/Impactos-sobre-la-salud-del-sector-transporte>>.
9. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Manejo Ambiental del Polvo [online]. Colombia [Citado 10 marzo de 2014]. Disponible en Web Minambiente:<<http://www.minambiente.gov.co/Puerta/destacado/vivienda/g>

estion_ds_municipal/nuevas_guias/carbon_mineria_cielo_abierto/contenid/medidas2.htm>.

10. LOPEZ, Carlos. Manual de restauración de terrenos y evaluación de impactos ambientales en minería. Madrid, 1989. 73-83 p. Instituto Tecnológico GeoMinero de España.
11. VELAZQUEZ, Edgar Augusto. Alternativas de mitigación de emisiones de material particulado generado por la planta de triturados Yopal (Casanare). Bogotá D.C.: Universidad Libre. Facultad de Ingeniería. Instituto de posgrados, 2011. 53 p.
12. AMORTEGUI J.V. Utilización de llantas de desecho en obras civiles. 56 p.
13. CAMPO, María. Guía para el manejo de llantas usadas. Bogotá, 2006. 15-43 p. Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente, Cámara de Comercio de Bogotá.
14. CASTRO, Guillermo. Reutilización, reciclado y disposición final de neumáticos. Departamento de Ingeniería mecánica F.I.U.B.A. 2007. 3,4 p.
15. Gobierno del Distrito Federal México. Llantas usadas diagnóstico de la situación actual en el distrito Federal. 2002. 14, 17, 19, 20, 21 p.
16. ANGULO, Ricardo Alberto y DUARTE, José Luis. Modificación de un asfalto con caucho reciclado de llanta para su aplicación en pavimentos. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de ciencias fisicoquímicas. 2005.
17. CABERO COLIN, Fernando. Experiencia Española del caucho NFU en las mezclas asfálticas.
18. SHU, Xiang. 2013. Recycling of waste tire rubber in asphalt and portland cement concrete: An overview. Construction and Building Materials.
19. Mundo Limpio, Aplicaciones Caucho Pulverizado [online]. El Carmen de Viboral (Colombia), [Citado 12 febrero de 2014]. Disponible en Web: <<http://www.mundolimpio.com.co/node/15>>.
20. Procesadora de Cales PROCECAL, Cal Viva [online]. Medellín (Colombia), [Citado 24 de abril de 2014]. Disponible en PROCECAL S.A.S. Web: <<http://www.procecal.com/home.html>>.

21. SKARIA, Blessen. 2013. Mechanical properties and durability characteristics of concrete containing solid waste materials. *Journal of Cleaner Production*. 30, 1-6 p.
22. LING, Tung-Chai. 2012. Effects of compaction method and rubber content on the properties of concrete paving blocks. *Construction and Building Materials*. 28, 164-175.
23. ARRIETA, Fabián. Guía para la estabilización o mejoramiento de rutas no pavimentadas. San José, 2008. 10-28 p. Universidad de Costa Rica.
24. ASTM Standards. Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus. Designation: G65 – 04. Reapproved 2010. 2-9 p.
25. Camineros en la red. Diseño de pavimentos suelo-cemento [online]. Latinoamérica. [Citado el 28 de abril de 2014]. Disponible en: <http://www.camineros.com/docs/cam066.pdf>.
26. BOLDEN, Johnny. 2013. Utilization of recycled and waste materials in various construction applications. *American Journal of Environmental Science*. 9, 14-24 p.
27. Agencia Nacional de Infraestructura [online]. Colombia [Citado: 1 junio 2014]. Disponible en: <http://www.larepublica.co/antioquia-ya-tiene-listos-141-kil%C3%B3metros-de-las-autopistas-de-prosperidad-130096>.

BIBLIOGRAFÍA

- AGENCIA NACIONAL DE INFRAESTRUCTURA [online]. Colombia [Citado: 1 junio 2014]. Disponible en: http://www.larepublica.co/antioquia-ya-tiene-listos-141-kil%C3%B3metros-de-las-autopistas-de-prosperidad_130096.
- AMÓRTEGUI J.V. Utilización de llantas de desecho en obras civiles. 56 p.
- ANGULO, Ricardo Alberto y DUARTE, José Luis. Modificación de un asfalto con caucho reciclado de llanta para su aplicación en pavimentos. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de ciencias fisicoquímicas. 2005.
- ARRIETA, Fabián. Guía para la estabilización o mejoramiento de rutas no pavimentadas. San José, 2008. 10-28 p. Universidad de Costa Rica.
- ASTM Standards. Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus. Designation: G65 – 04. Reapproved 2010. 2-9 p.
- BOLDEN, Johnny. 2013. Utilization of recycled and waste materials in various construction applications. American Journal of Environmental Science. 9, 14-24 p.
- CABERO COLÍN, Fernando. Experiencia Española del caucho NFU en las mezclas asfálticas.
- CAMINEROS EN LA RED. Diseño de pavimentos suelo-cemento [online]. Latinoamérica. [Citado el 28 de abril de 2014]. Disponible en: <http://www.camineros.com/docs/cam066.pdf>.

- CAMPO, María. Guía para el manejo de llantas usadas. Bogotá, 2006. 15-43 p. Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente, Cámara de Comercio de Bogotá.
- CASTRO, Guillermo. Reutilización, reciclado y disposición final de neumáticos. Departamento de Ingeniería mecánica F.I.U.B.A. 2007. 3,4 p.
- CASTRO, Henry. Caracterización fisicoquímica de material particulado y Aplicación de modelos receptor-fuente en el área Metropolitana de Bucaramanga. Bucaramanga, 2010. 7-9 p. Corporación Autónoma para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga.
- CONSORCIO PRIME ENGENHARIA, Asociación Potlatch. EEIA y Evaluación Ambiental Estratégica del Corredor Santa Cruz. Puerto Suarez, 2010. Museo Noel Kempff Mercado.
- FIGUEROA, Sofía. Estabilización de Suelos con Cal. 2010. Maestría en Vías Terrestres.
- Fundación Biodiversidad del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Impactos sobre la salud del sector transporte [online]. Madrid (España), 2014, [Citado abril 1 de 2014]. Disponible en web ECODES: <<http://www.ecodes.org/salud-calidad-aire/201302176138/Impactos-sobre-la-salud-del-sector-transporte>>.
- GOBIERNO DEL DISTRITO FEDERAL MÉXICO. Llantas usadas diagnóstico de la situación actual en el distrito Federal. 2002. 14, 17, 19, 20, 21 p.
- LING, Tung-Chai. 2012. Effects of compaction method and rubber content on the properties of concrete paving blocks. Construction and Building Materials. 28, 164-175.

- LÓPEZ, Carlos. Manual de restauración de terrenos y evaluación de impactos ambientales en minería. Madrid, 1989. 73-83 p. Instituto Tecnológico GeoMinero de España.
- MARÍN, B. producción de carbones activados a partir de neumáticos usados y su aplicación en procesos de adsorción. 2012.
- MARÍN, Beatriz. En favor del medio ambiente: de llanta vieja a carbón activado. 2012.
- MINISTERIO DE AGRICULTURA, Alimentación y Medio Ambiente, Calidad del Aire [online]. Madrid (España), 2012 [Citado 5 abril de 2014]. Disponible en Web Ayuntamiento de Madrid: <<http://www.mambiente.munimadrid.es/opencms/opencms/calair/ContaAtmosferica/portadilla.html>>.
- MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE, Manejo Ambiental del Polvo [online]. Colombia [Citado 10 marzo de 2014]. Disponible en Web Minambiente:<http://www.minambiente.gov.co/Puerta/destacado/vivienda/gestion_ds_municipal/nuevas_guias/carbon_mineria_cielo_abierto/contenid/medidas2.htm>.
- MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA, Ministerio del Medio Ambiente. Manejo de Impactos Ambientales: guía minero ambiental de explotación. 2001. 13-20 p. MMA & MINERCOL.
- MUNDO LIMPIO, Aplicaciones Caucho Pulverizado [online]. El Carmen de Viboral (Colombia), [Citado 12 febrero de 2014]. Disponible en Web: <<http://www.mundolimpio.com.co/node/15>>.

- PROCESADORA DE CALES PROCECAL, Cal Viva [online]. Medellín (Colombia), [Citado 24 de abril de 2014]. Disponible en PROCECAL S.A.S. Web: <<http://www.procecal.com/home.html>>.
- SHU, Xiang. 2013. Recycling of waste tire rubber in asphalt and portland cement concrete: An overview. *Construction and Building Materials*.
- SKARIA, Blessen. 2013. Mechanical properties and durability characteristics of concrete containing solid waste materials. *Journal of Cleaner Production*. 30, 1-6 p.
- VELÁZQUEZ, Edgar Augusto. Alternativas de mitigación de emisiones de material particulado generado por la planta de triturados Yopal (Casanare). Bogotá D.C.: Universidad Libre. Facultad de Ingeniería. Instituto de posgrados, 2011. 53 p.