

	UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA			
	Documento	Código	Fecha	Revisión
	FORMATO HOJA DE RESUMEN PARA TRABAJO DE GRADO	F-AC-DBL-007	08-07-2021	B
	Dependencia	Aprobado		Pág.
DIVISIÓN DE BIBLIOTECA	SUBDIRECTOR ACADEMICO		i(94)	

RESUMEN – TRABAJO DE GRADO

AUTORES	Gerbin Alonso Barbosa Sánchez Edwar Enrique Malkun Caballero		
FACULTAD	Ingenierías		
PLAN DE ESTUDIOS	Ingeniería Civil		
DIRECTOR	Katerine Carreño García		
TÍTULO DE LA TESIS	Comparación de las propiedades de las mezclas asfálticas en caliente con adición de cenizas de cáscara de arroz, cenizas de caña de maíz y cenizas de carbón como reemplazo del llenante mineral.		
TITULO EN INGLES	Comparison of the properties of hot asphalt mixes with the addition of rice husk, ash, corn cane ash and coal ash as a replacement for mineral filler.		
RESUMEN (70 palabras)			
Monografía de compilación referente a las propiedades obtenidas en las mezclas asfálticas en caliente al adicionar cenizas de cáscara de arroz, cenizas de caña de maíz y cenizas de carbón, con el objetivo de reemplazar el llenante mineral de la mezcla.			
El desarrollo de esta monografía permite la difusión de la inclusión de nuevos materiales en las mezclas asfálticas en caliente, brindando así alternativas ambientales y sostenibles.			
RESUMEN EN INGLES			
Compilation monograph referring to the properties obtained in hot asphalt mixtures when adding rice husk ash, corn cane ash and coal ash, with the aim of replacing the mineral filler in the mixture.			
The development of this monograph allows the dissemination of the inclusion of new materials in hot asphalt mixtures, thus providing environmental and sustainable alternatives.			
PALABRAS CLAVES	Cenizas, Llenante mineral, Mezclas asfálticas en caliente, Cáscara de arroz, Caña de maíz, y Carbón.		
PALABRAS CLAVES EN INGLES	Ash, Mineral Filler, Hot Asphalt Mixes, Rice Husk, Corn Cane, and Charcoal.		
CARACTERÍSTICAS			
PÁGINAS: 95	PLANOS: 0	ILUSTRACIONES: 0	CD-ROM: 1



COMPARACIÓN DE LAS PROPIEDADES DE LAS MEZCLAS ASFÁLTICAS EN
CALIENTE CON ADICIÓN DE CENIZAS DE CÁSCARA DE ARROZ, CENIZAS DE CAÑA
DE MAÍZ Y CENIZAS DE CARBÓN COMO REEMPLAZO DEL LLENANTE MINERAL

Autores

GERBIN ALONSO BARBOSA SÁNCHEZ

EDWAR ENRIQUE MALKUN CABALLERO

Trabajo de grado modalidad monografía para optar el título de Ingeniero Civil

Director

MSc. KATERINE CARREÑO GARCÍA

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER OCAÑA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

PLAN DE ESTUDIOS DE INGENIERÍA CIVIL

Ocaña, Colombia

Agosto, 2021

Agradecimientos

Los autores de esta monografía expresan su cordial agradecimiento al MSc. Katerine Carreño García, por la dirección del trabajo, su apoyo y colaboración permanente durante toda la investigación.

Así mismo agradecen a todas aquellas personas que de una u otra manera aportaron en este trabajo: amigos, compañeros y docentes, así como aquellos profesionales que brindaron su ayuda, especialmente al Ing. Luis Miguel Duarte Vergara por su acompañamiento y colaboración en todas las etapas del proyecto.

Finalmente agradecen a la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña por brindar los conocimientos y las herramientas necesarias para desarrollar este trabajo.

Gerbin Alonso Barbosa Sánchez

Edwar Enrique Malkun Caballero

Tabla de contenido

Introducción.....	xii
Capítulo 1. Generalidades	1
1.1 Título de la monografía	1
1.2 Planteamiento del problema	1
1.3 Objetivo	3
1.4 Justificación.....	3
1.5 Metodología.....	4
Capítulo 2. Características físicas de los agregados naturales, agregados de reemplazo y asfalto.....	6
2.1 Cenizas adicionadas a las mezclas asfálticas en caliente	7
2.1.1 Cáscara de arroz.	8
2.1.2 Caña de maíz.	10
2.1.3 Carbón.	11
2.2 Estudios recopilados.....	13
2.3 Características físicas indicadas en los estudios recopilados	16
2.3.1 Granulometría de las mezclas asfálticas en caliente.....	16
2.3.2 Granulometría de las cenizas adicionadas en las mezclas asfálticas en caliente	23
2.3.3 Contenido de cenizas adicionadas en las mezclas asfálticas en caliente	23
2.3.4 Contenido de asfalto adicionado en las mezclas asfálticas en caliente.	25
2.3.5 Densidad de las mezclas asfálticas en caliente con adición de cenizas.....	30
2.3.6 Contenido de vacíos de aire de las mezclas asfálticas en caliente con adición de cenizas.....	35
Capítulo 3. Propiedades químicas de los agregados de reemplazo	41
3.1 Ensayos de fluorescencia de rayos X en las cenizas	42
3.1.1 Ceniza cáscara de arroz.	46
3.1.2 Ceniza caña de maíz.	48

3.1.3 Ceniza carbón.....	49
3.2 Clasificación de las cenizas.....	50
Capítulo 4. Propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica en caliente convencional y modificada.....	53
4.1 Estabilidad y Flujo.....	53
4.1.1 Estabilidad.....	54
4.1.2 Flujo.....	60
Capítulo 5. Aspectos ambientales y socioeconómicos asociados a las mezclas asfálticas en caliente en comparación a las mezclas modificadas.....	66
5.1 Reducción de residuos sólidos.....	66
5.2 Reducción de emisiones a la atmósfera.....	67
5.3 Reemplazo del llenante mineral.....	69
5.3.1 Cenizas de cáscara de arroz.....	70
5.3.2 Cenizas de caña de maíz.....	71
5.3.3 Cenizas de carbón.....	72
5.4 Efecto del reemplazo del llenante mineral.....	73
Conclusiones.....	75
Referencias.....	77

Lista de tablas

Tabla 1. Estudios e investigaciones recopiladas con adición de cenizas de cáscara de arroz	13
Tabla 2. Estudios e investigaciones recopilados con adición de cenizas de caña de maíz..	14
Tabla 3. Estudios e investigaciones recopilados con adición de cenizas de carbón.....	15
Tabla 4. Granulometría de los estudios recopilados con adición de cenizas de cáscara de arroz	17
Tabla 5. Granulometría de los estudios recopilados con adición de cenizas de caña de maíz	18
Tabla 6. Granulometría de los estudios recopilados con adición de cenizas de carbón	18
Tabla 7. Franjas granulométricas para mezclas densas tipo MDC-19 indicadas en el Artículo 450 del INVIAS	19
Tabla 8. Contenido óptimo de ceniza de cáscara de arroz en la mezcla asfáltica en caliente indicado en los estudios recopilados	24
Tabla 9. Contenido óptimo de ceniza de caña de maíz en la mezcla asfáltica en caliente indicado en los estudios recopilados	24
Tabla 10. Contenido óptimo de ceniza de carbón en la mezcla asfáltica en caliente indicado en los estudios recopilados.....	25
Tabla 11. Contenido de ceniza óptimo y de asfalto indicado para las mezclas asfálticas en caliente con adición de cenizas de cáscara de arroz	26
Tabla 12. Contenido de ceniza óptimo y de asfalto indicado para las mezclas asfálticas en caliente con adición de cenizas de caña de maíz	28
Tabla 13. Contenido de ceniza óptimo y de asfalto indicado para las mezclas asfálticas en caliente con adición de cenizas de carbón	29
Tabla 14. Resultados de la densidad de mezclas asfálticas en caliente con adición de ceniza de cáscara de arroz	31
Tabla 15. Resultados de la densidad de mezclas asfálticas en caliente con adición de ceniza de caña de maíz	32
Tabla 16. Resultados de la densidad de mezclas asfálticas en caliente con adición de ceniza de carbón	33
Tabla 17. Contenido de vacíos de aire en las mezclas asfálticas en caliente con adición de ceniza de cáscara de arroz	36
Tabla 18. Contenido de vacíos de aire en las mezclas asfálticas en caliente con adición de ceniza de caña de maíz	37
Tabla 19. Contenido de vacíos de aire en las mezclas asfálticas en caliente con adición de ceniza de carbón	38
Tabla 20. Resultado de las composición química de las cenizas de cáscara de arroz recopiladas	44

Tabla 21. Resultado de la composición química de las cenizas de caña de maíz recopiladas	44
Tabla 22. Resultado de la composición química de las cenizas de carbón recopiladas	45
Tabla 23. Sumatoria de los minerales: sílice, alúmina y hierro, en las cenizas de cáscara de arroz	46
Tabla 24. Sumatoria de los minerales: sílice, alúmina y hierro, en las cenizas de caña de maíz.....	48
Tabla 25. Sumatoria de los minerales: sílice, alúmina y hierro, en las cenizas de carbón ..	49
Tabla 26. Contenido de cal de las cenizas de carbón recopiladas	52
Tabla 27. Estabilidad en las mezclas asfálticas en caliente con adición de ceniza de cáscara de arroz.....	55
Tabla 28. Estabilidad en las mezclas asfálticas en caliente con adición de ceniza de caña de maíz.....	57
Tabla 29. Estabilidad en las mezclas asfálticas en caliente con adición de ceniza de carbón	58
Tabla 30. Flujo en las mezclas asfálticas en caliente con adición de ceniza de cáscara de arroz	61
Tabla 31. Flujo en las mezclas asfálticas en caliente con adición de ceniza de caña de maíz	63
Tabla 32. Flujo en las mezclas asfálticas en caliente con adición de ceniza de carbón	64
Tabla 33. Reemplazo del llenante mineral en la mezcla asfáltica en caliente con adición de cenizas de cáscara de arroz	70
Tabla 34. Reemplazo del llenante mineral en la mezcla asfáltica en caliente con adición de cenizas de caña de maíz	71
Tabla 35. Reemplazo del llenante mineral en la mezcla asfáltica en caliente con adición de cenizas de carbón	72

Lista de figuras

Figura 1. Cáscara de arroz. Obtenido en: https://canalupe.com/product/cascarilla-de-arroz/9	
Figura 2. Caña de maíz. Obtenido en: https://agroexcelencia.com/maiz-y-cana-de-azucar-cultivos-no-adaptados-para-aprovechar-los-niveles-modernos-de-bioxido-de-carbono/	10
Figura 3. Carbón. Obtenido en: https://www.valoraanalitik.com/2019/05/14/colombia-tiene-reservas-de-carbon-para-180-anos-esta-en-top-10-de-paises-con-mas-cantidad/	12
Figura 4. Gráfico granulometría mezclas asfálticas en caliente con adición de cenizas de cáscara de arroz. Autores, 2020.	20
Figura 5. <i>Gráfico granulometría mezclas asfálticas en caliente con adición de cenizas de caña de maíz. Autores, 2020.</i>	21
Figura 6. Gráfico granulometría mezclas asfálticas en caliente con adición de cenizas de carbón. Autores, 2020.	22
Figura 7. Gráfico de la correlación entre el contenido óptimo de ceniza de cáscara de arroz y el grado de penetración del asfalto. Autores, 2020.	28
Figura 8. Gráfico de la correlación entre el contenido óptimo de ceniza de caña de maíz y el grado de penetración del asfalto. Autores, 2020.	29
Figura 9. Gráfico de la correlación entre el contenido óptimo de ceniza de carbón y el grado de penetración del asfalto. Autores, 2020.	30
<i>Figura 10.</i> Gráfico de la densidad de mezclas asfálticas en caliente con adición de ceniza de cáscara de arroz. Autores, 2021.	32
Figura 11. Gráfico de la densidad de mezclas asfálticas en caliente con adición de ceniza de caña de maíz. Autores, 2021.	33
Figura 12. Gráfico de la densidad de mezclas asfálticas en caliente con adición de ceniza de carbón. Autores, 2021.	34
Figura 13. Porcentaje de disminución de la densidad con adición de ceniza. Autores, 2021.	35
<i>Figura 14.</i> Gráfico del contenido de vacíos de aire de las mezclas asfálticas en caliente con adición de ceniza de cáscara de arroz. Autores, 2021.	37
Figura 15. Gráfico del contenido de vacíos de aire de las mezclas asfálticas en caliente con adición de ceniza de caña de maíz. Autores, 2021.	38
Figura 16. Gráfico del contenido de vacíos de aire de las mezclas asfálticas en caliente con adición de ceniza de carbón. Autores, 2021.	39
Figura 17. Porcentaje de aumento del contenido de vacíos de aire en las mezclas asfálticas en caliente con adición de ceniza. Autores, 2021.	40
Figura 18. Equipo de fluorescencia de rayos X o XRF. Obtenido en: https://www.rptechlab.com/producto/fluorescencia-de-rayos-x-wdxf-marca-rigaku-zsx-primus/	43
Figura 19. Gráfico de la sumatoria de sílice, alúmina y hierro, en las cenizas de cáscara de arroz. Autores, 2021.	47

Figura 20. Gráfico de la sumatoria de sílice, alúmina y hierro, en las cenizas de cáscara de arroz. Autores, 2021.....	48
Figura 21. Gráfico de la sumatoria de sílice, alúmina y hierro, en las cenizas de cáscara de arroz. Autores, 2021.....	50
Figura 22. Equipo empleado para realización del ensayo de estabilidad y flujo. Obtenido en: http://proetisa.com/proetisa-productos.php?ID=219	54
Figura 23. Gráfico de la estabilidad de las mezclas asfálticas en caliente con adición de ceniza de cáscara de arroz. Autores, 2021.	56
Figura 24. Gráfico de la estabilidad de las mezclas asfálticas en caliente con adición de ceniza de caña de maíz. Autores, 2021.	58
Figura 25. Gráfico de la estabilidad de las mezclas asfálticas en caliente con adición de ceniza de carbón. Autores, 2021.	59
Figura 26. Porcentaje de aumento de la estabilidad con adición de cenizas. Autores, 2021.	60
Figura 27. Gráfico del flujo de las mezclas asfálticas en caliente con adición de ceniza de cáscara de arroz. Autores, 2021.	62
Figura 28. Gráfico del flujo de las mezclas asfálticas en caliente con adición de ceniza de caña de maíz. Autores, 2021.	64
Figura 29. Gráfico del flujo de las mezclas asfálticas en caliente con adición de ceniza de carbón. Autores, 2021.	65
Figura 30. Gráfico del porcentaje de reemplazo del llenante mineral con adición de cenizas de cáscara de arroz en función del grado de penetración del asfalto. Autores, 2021.	71
Figura 31. Gráfico del porcentaje de reemplazo del llenante mineral con adición de cenizas de caña de maíz en función del grado de penetración del asfalto. Autores, 2021.	72
Figura 32. Gráfico del porcentaje de reemplazo del llenante mineral con adición de cenizas de carbón en función del grado de penetración del asfalto. Autores, 2021.	73
Figura 33. Gráfico del porcentaje de remplazo mínimo y máximo del llenante mineral con cada tipo de ceniza. Autores, 2021.	74

Introducción

Las vías permiten el transporte masivo de pasajeros y mercancías en todo el mundo, lo que ha conllevado a que la mayoría de países se encarguen de garantizar el adecuado estado de su infraestructura vial para permitir una eficaz comunicación y un óptimo traslado de un lugar a otro. Sin embargo, el desarrollo de las vías ha representado un alto impacto sobre el medio ambiente, dado que se requieren enormes cantidades de recursos naturales para su construcción (Parra & Gallo, 2018).

Por otra parte, y sumada a las problemáticas ambientales actuales, se encuentra la alta producción de cenizas, especialmente de la industria termoeléctrica: cenizas de carbón, así como aquellas provenientes de materias agrícolas: cenizas de caña de maíz y cáscara de arroz. Estas cenizas en conjunto, representan un alto potencial de contaminación para el medio ambiente, así como un causante directo del deterioro de la salud en los seres humanos (Parra & Gallo, 2018).

Por lo anterior, en distintos países del mundo se han venido desarrollado investigaciones con las cuales se busca mejorar el comportamiento de las mezclas asfálticas en caliente adicionando cenizas de caña de maíz, cáscara de arroz, y de carbón, de tal forma que se logre dar un uso alternativo a estos residuos, al mismo tiempo que mejoren las características de la mezcla (Rosales, 2019; Parra & Gallo, 2018).

El propósito de emplear este tipo de cenizas es reemplazar los materiales comúnmente empleados como llenante mineral o filler en la mezcla asfáltica en caliente. Esta monografía se centra en describir los resultados obtenidos en diversos estudios, en los cuales se ha adicionado cenizas de caña de maíz, cáscara de arroz y carbón en las mezclas, con el fin de comparar las variaciones que presenta respecto a la mezcla asfáltica convencional.

Capítulo 1. Generalidades

1.1 Título de la monografía

El presente trabajo consiste en una monografía de compilación titulada:

Comparación de las propiedades de las mezclas asfálticas en caliente con adición de cenizas de cáscara de arroz, cenizas de caña de maíz y cenizas de carbón como reemplazo del llenante mineral.

1.2 Planteamiento del problema

La inversión en infraestructura resulta indispensable para el crecimiento económico y social de un país. Las vías terrestres deben prestar un buen servicio en cuanto a la seguridad, comodidad y durabilidad, permitiendo la reducción de tiempos y costos en el transporte (Sánchez, 2014).

La modificación de los asfaltos es una técnica relativamente nueva, utilizada para el aprovechamiento efectivo de los asfaltos en la pavimentación de vías. Esta técnica consiste en la adición de las cenizas como llenante mineral o filler en las mezclas asfálticas convencionales con el fin de mejorar sus características físicas (Castillo, 2019).

El filler o llenante mineral es empleado en las mezclas asfálticas en caliente con el objetivo de aumentar la duración de la mezcla en el pavimento, completar la fracción granulométrica de la misma, mejorar sus propiedades y aumentar su resistencia contra la penetración del agua al endurecer el asfalto (Rangel & Sarmiento, 2010; Modarres & Rahmzadeh, 2014).

Generalmente el filler consiste en materiales que pasan el tamiz No.200 (0,0075 mm), como el material producto de la trituración del agregado pétreo, la cal, el cemento, el polvo de tiza, el talco, la sílice, entre otros. En las últimas décadas, a causa de los cambios medioambientales y socioeconómicos, se ha buscado la forma de reemplazar estos materiales aprovechando las cenizas provenientes de la cáscara de arroz, caña de maíz y del carbón, y comprobar si es adecuado utilizarlas como reemplazo del filler o llenante mineral (Mistry & Kumar, 2016; Parra & Gallo, 2018; Reyes & Rincón, 2009; Aduato, 2019).

Sin embargo, se han desarrollado con el paso de los años varios estudios e investigaciones referentes a este tema, pero no se ha realizado una comparación de las propiedades que se obtienen en las mezclas asfálticas al adicionar cada tipo de ceniza, por lo cual, no se ha definido qué tipo de adición representa mejores ventajas en el mejoramiento de las propiedades, lo que hizo necesario llevar a cabo una recopilación y análisis de información referente a este tema, para realizar esta comparación, además de indicar las repercusiones ambientales y sociales que surgen de la utilización de estas cenizas.

1.3 Objetivo

Recopilar y analizar información existente sobre las propiedades mecánicas, químicas y físicas obtenidas en mezclas asfálticas en caliente en las cuales se ha adicionado alguno de los siguientes materiales: cenizas de cáscara de arroz, cenizas de caña de maíz, y cenizas de carbón, con el fin de reemplazar el contenido de filler o llenante mineral en la mezcla.

1.4 Justificación

La infraestructura vial debe mantenerse en óptimas condiciones para lograr movilizar la mayor cantidad de productos, mercancías y personas de forma eficiente. Esta situación ha demandado la búsqueda de un aprovechamiento y reutilización de materiales para la fabricación de mezclas asfálticas que permitan minimizar los costos a la vez que mejoren sus cualidades. De esta manera, en las últimas décadas se ha buscado dar un aprovechamiento a los residuos generados en los procesos de producción agroindustrial de tal forma que se planteen nuevas soluciones con beneficios económicos y ambientales. Estas experiencias han permitido mejorar las propiedades físicas, mecánicas y químicas de las mezclas asfálticas en caliente, de tal forma que sean adecuadas para construcción de vías (Sánchez, 2014).

Estas cenizas se caracterizan por sus propiedades puzolánicas, es decir, tienen la capacidad de actuar como aglomerante, uniendo las partículas que conforman la mezcla asfáltica (agregados pétreos y asfalto) (Reyes & Rincón, 2009). Numerosas investigaciones desarrolladas

hasta la fecha con este tipo de cenizas han buscado determinar el porcentaje en el cual permiten que la mezcla asfáltica cumpla con los requerimientos exigidos. El uso de las cenizas está encaminado principalmente a mejorar la durabilidad de la mezcla en el pavimento, así como aumentar su resistencia a las deformaciones y al fisuramiento (Ramme, Covi, Faheem, & Sobolev, 2016).

Con el desarrollo de esta monografía se busca sintetizar el conocimiento existente sobre la utilización y aprovechamiento de las cenizas de cáscara de arroz, caña de maíz y carbón con la finalidad de prolongar la vida útil de las mezclas asfálticas en caliente, y por lo tanto, de los pavimentos flexibles. Con el uso de estas cenizas se brinda una alternativa para contribuir con el cuidado del medio ambiente (Peña, 2019).

1.5 Metodología

En este trabajo se presenta una propuesta metodológica enfocada en sintetizar y analizar la información más relevante sobre las propiedades de las mezclas asfálticas en caliente, con adición de cenizas de cáscara de arroz, cenizas de caña de maíz y cenizas de carbón empleadas como reemplazo del filler o llenante mineral, para ello se estudiaron las investigaciones, normativas y aplicaciones realizadas hasta la fecha.

La metodología de investigación que se utilizó fue el metaanálisis, el cual consiste en una técnica que permite sintetizar la evidencia procedente de estudios disponibles sobre el tema de interés en el marco de una revisión sistemática previa (Botella & Zamora, 2017).

El desarrollo de la monografía comprendió la ejecución de cuatro etapas. La primera etapa consistió en la revisión de información bibliográfica referente al tema de estudio. La segunda etapa comprendió el análisis y selección de la información disponible. En la tercera etapa se realizó la recopilación de la información relevante, y por último, en la cuarta etapa, se desarrollaron los capítulos planteados a continuación:

Capítulo 1. Generalidades.

Capítulo 2. Características físicas de los agregados naturales, agregados de reemplazo y asfalto.

Capítulo 3. Propiedades químicas de los agregados de reemplazo.

Capítulo 4. Propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica en caliente convencional y modificada.

Capítulo 5. Aspectos ambientales y socioeconómicos asociados a las mezclas asfálticas en caliente en comparación a las mezclas modificadas.

Capítulo 2. Características físicas de los agregados naturales, agregados de reemplazo y asfalto

Las vías o carreteras son un componente vital dentro del patrimonio de cualquier nación, siendo vinculadas directamente con el desarrollo económico y social, dadas las ventajas que ofrece para la comunicación e interconexión entre los centros urbanos, además de facilitar el intercambio de bienes y servicios. Esta situación ha conllevado a dar gran importancia a los pavimentos flexibles, pues estos son los más implementados a nivel mundial, sin embargo, presentan un gran inconveniente, tienen un período de diseño finito, por lo cual su falla está prevista al terminar su vida útil (Aduato, 2019).

Para la construcción de pavimentos flexibles se utilizan mezclas asfálticas, existen de diferentes tipos, clasificándose de acuerdo a la temperatura de mezclado, el porcentaje de vacíos, la granulometría, entre otros. El desarrollo de este trabajo se limitara a las mezclas asfálticas en caliente (Aduato, 2019).

Las mezclas asfálticas se definen como una combinación de distintos materiales para conformar la carpeta de rodadura de un pavimento flexible. Entre los materiales usados se encuentran agregados minerales y pétreos que son aglomerados empleando materiales asfálticos, los cuales, mediante un proceso de mezclado, permite que el agregado pétreo quede cubierto de una capa uniforme de asfalto (Garnica, 2005).

Uno de los componentes de las mezclas asfálticas en caliente es el llenante mineral, o también denominado filler (del inglés, rellenedor o llenante). El llenante mineral o filler consiste en un material finamente molido o pulverizado, cuyo tamaño de partículas pasan por el tamiz N°200 (0,075 mm). Comúnmente el llenante mineral es considerado como parte del sistema de agregados. Dentro de la mezcla asfáltica en caliente el llenante mineral permite rellenar los vacíos que se generan entre los agregados de mayor tamaño, además de incrementar la resistencia a la deformación de la mezcla y su durabilidad (Aduato, 2019; Ali, Chan, Simms, Bushman, & Bergan, 1996).

El llenante mineral suele provenir de los procesos de trituración y clasificación de los agregados pétreos, aunque también se permite utilizar productos comerciales, generalmente cal hidratada o cemento Portland, en cuyo caso se denomina como llenante mineral de aporte. Actualmente, se ha buscado reemplazar el llenante mineral añadiendo cenizas en las mezclas asfálticas. Este trabajo se centra en el uso de tres tipos de cenizas de distinto origen: cáscara de arroz, caña de maíz, y carbón (Parra & Gallo, 2018).

2.1 Cenizas adicionadas a las mezclas asfálticas en caliente

Se define como ceniza al residuo inorgánico que queda tras eliminar totalmente los compuestos orgánicos existentes de determinado material, al ser sometido a procesos de combustión o calcinación. En el caso de las cenizas de carbón, éstas suelen denominarse como

cenizas volantes, pues son recolectadas en las chimeneas de las centrales termoeléctricas (Reyes & Rincón, 2009; Troncoso, Camacho, & Reyes, 2006).

Las cenizas suelen utilizarse en grandes cantidades, especialmente para la producción de cementos y concretos, rellenos estructurales y no estructurales, estabilización de desechos, bases y sub-bases para pavimentos, acondicionamiento de suelos, entre otros usos. En el caso de las mezclas asfálticas en caliente, se han desarrollado investigaciones para determinar si la adición de cenizas permite una mejora de las propiedades de la mezcla, y si es adecuada o no su adición (Reyes & Rincón, 2009; Troncoso, Camacho, & Reyes, 2006).

A continuación se muestra una breve descripción de los materiales de donde provienen las cenizas consideradas en el presente trabajo:

2.1.1 Cáscara de arroz.

La cáscara de arroz, es un material de desecho que resulta de los procesos de molienda del arroz. Suele utilizarse en los procesos de refrigeración artesanal y como acolchado en establos, sin embargo, la mayor parte de este residuo debe ser totalmente desechado ya que no existe un aprovechamiento a escala industrial. Según algunas estimaciones, por cada tonelada de arroz se generan 180 kilos de cáscara, esto representa grandes volúmenes que deben ser manejados por los molineros. Para facilitar el transporte de estos residuos, la cáscara de arroz se calcina para ser

finalmente depositada en rellenos sanitarios o basureros. En la figura 1 se observa la forma común de la cáscara de arroz (Lizcano & Ramos, 2020).



Figura 1. Cáscara de arroz. Obtenido en: <https://canalupe.com/product/cascarilla-de-arroz/>

La cáscara de arroz está conformada por dos cascarillas, una interna y una externa. La cascarilla interna, que es extremadamente delgada, se llama salvado y es útil para uso comestible. La cascarilla externa, que es más gruesa, no es adecuada para comer. Dado que no existe un proceso tecnificado de separación de estas dos cascarillas, la cáscara de arroz es totalmente desechada. Cuando se incinera o se quema la cáscara de arroz, aproximadamente el 75% de su peso se agota en forma de materiales orgánicos volátiles, y solo un 25% permanece en forma de ceniza (Shafabakhsh., Divandari, & Reza, 2018).

2.1.2 Caña de maíz.

El maíz es uno de los cereales más cultivados en el mundo, destinado principalmente para consumo humano, engorde de animales y la producción de biocombustibles. En el caso de la caña de maíz, que es la plántula donde se desarrolla la mazorca que contiene los granos (maíz), esta es actualmente empleada para obtener alcohol antiséptico, papel artesanal, dulces y caramelos. Esta caña se caracteriza por ser maciza, de altura vertical variable, oscilando entre 0,80 a 2,5 m, en algunos casos hasta 4,0 m. en la figura 2 muestra este tipo de cañas (Aauto, 2019).



Figura 2. Caña de maíz. Obtenido en: <https://agroexcelencia.com/maiz-y-cana-de-azucar-cultivos-no-adaptados-para-aprovechar-los-niveles-modernos-de-bioxido-de-carbono/>

Según estimaciones dadas por el Fondo Internacional de Desarrollo Agrícola (FIDA), anualmente se generan más de 250 millones de toneladas de cañas de maíz en todo el mundo. Estas cañas no se descomponen lo suficientemente rápido después de ser cosechado el maíz, por lo que antes de iniciar la siguiente siembra se realiza la remoción de estas cañas para ser transportadas a otros lugares para su incineración, aunque también es usual realizar montículos

dentro de las mismas áreas de cultivo con el fin de incinerarlas. De esta manera se genera una alta contaminación del aire, pues como ya se mencionó, se deben quemar millones de toneladas de cañas de maíz, produciéndose de esta manera altas concentraciones de dióxido de carbono (Yi & Feng, 2019).

Además de la contaminación atmosférica, se ha demostrado que la incineración de la caña de maíz reduce la fertilidad del suelo, disminuye su humedad y el contenido de materia, nitrógeno, fósforo y otros minerales importantes, además de aumentar el pH, con lo cual se afectan las próximas siembras y los rendimientos de las cosechas. Por esta razón, en muchos países está prohibido realizar este tipo de quemas o incineraciones, sin embargo, las pocas medidas y la ineficiencia en los controles, conducen a que en la actualidad, gran parte de este material siga siendo incinerado. Para dar un aprovechamiento a este material, en países como Estados Unidos, Japón, Canadá y los países de Europa Occidental, se han desarrollado algunas tecnologías donde se emplea la caña de maíz para generar energía, así como elemento de adición en algunos materiales, entre ellos el cemento y las mezclas asfálticas. A pesar de estos esfuerzos, la cantidad de caña de maíz utilizada sigue siendo muy reducida (Yi & Feng, 2019).

2.1.3 Carbón.

El carbón es empleado principalmente para la producción de energía eléctrica a nivel mundial. Colombia es uno de los mayores productores de este mineral, siendo exportado a países como China, Estados Unidos y países europeos. Las plantas donde se genera electricidad a partir

de este mineral se denominan como termoeléctricas, y son consideradas como grandes generadoras de emisiones contaminantes. Actualmente, y con el fin de mitigar su alto impacto ambiental, se han propuesto alternativas para aprovechar los residuos que genera esta actividad, entre ellas, el empleo de las cenizas que se producen en los hornos donde se incinera el carbón. Las cenizas se recolectan mediante filtros ubicados en las chimeneas de estas plantas. Uno de los usos que se ha investigado durante las últimas décadas, es su incorporación en mezclas asfálticas en caliente. En la figura 3 se observa el aspecto común de este mineral (Bautista, Díaz, & Martínez, 2017; Rosales, 2019).



Figura 3. Carbón. Obtenido en: <https://www.valoraanalitik.com/2019/05/14/colombia-tiene-reservas-de-carbon-para-180-anos-esta-en-top-10-de-paises-con-mas-cantidad/>

Existen países con un gran número de centrales termoeléctricas, por lo que son los mayores generadores de cenizas de carbón en el mundo. No existen cálculos certeros sobre la cantidad de cenizas producidas mundialmente, sin embargo, entidades ambientales reportan que en China se producen más de 300 millones de toneladas al año, por lo que es el mayor productor del mundo, seguido de Rusia con más de 100 millones, Estados Unidos con más de 80 millones, y la Unión Europea con más de 50 millones. Otros países con elevada producción de estas cenizas son India

e Irán, con más de 30 millones cada uno. En Colombia se estima una producción anual cercana a las 10 millones de toneladas (Vasudevan, 2017; Modarres & Rahmanzadeh, 2014).

2.2 Estudios recopilados

Como ya se mencionó, este trabajo se concentró en tres tipos de cenizas provenientes de: la cáscara de arroz, la caña de maíz, y del carbón. En las tres tablas siguientes se presentan los estudios e investigaciones recopiladas que permitieron la obtención de la información correspondiente a las propiedades de las mezclas asfálticas en caliente con adición de este tipo de cenizas.

Tabla 1

Estudios e investigaciones recopilados con adición de cenizas de cáscara de arroz

Autor	Título de la investigación
Castillo, J., 2019	Resistencia a la deformación de una mezcla en caliente con adición de un 11% por cenizas de cáscara de arroz
Lizcano, O. & Ramos, D., 2020	Estudio del comportamiento físico-mecánico de mezclas asfálticas modificadas con llenante mineral de ceniza de la cascarilla resultante de la molienda del arroz
Shafabakhsh, G., Divandari, H. & Reza, S., 2018	Evaluation of optimum content of rice husk ash to improve the hot asphalt concrete performance
Sargin, et al., 2013	Evaluation of rice husk ash as filler in hot mix asphalt concrete
Hoe, et al., 2014	Utilisation of rice husk ash in asphaltic concrete pavement
Vijaya, A., Raj, A. & Dash, B., 2018	An experimental investigation of bitumen mix using rice straw ash as filler

Nota: Autores, 2021.

Continuación Tabla 1

Autor	Título de la investigación
Banerjee, J., Ahmed, J. & Rajbongshi, P., 2016	Evaluation of coal waste ash and rice husk ash on properties of pervious concrete pavement
Putra, R., et al., 2019	Preparation method of corn stalk fiber material and its performance investigation in asphalt concrete
Rengarasu, T., et al., 2018	Experimental study on partial replacement of bitumen using corn cob ash (CCA) in bituminous mix
Mohiey, M., Mahdy, H. & Ibrahim, M. 2019	Effect of cornstalk ash on the microstructure of cement-based material under sulfate attack

Nota: Autores, 2021.

Tabla 2

Estudios e investigaciones recopilados con adición de cenizas de caña de maíz

Autor	Título de la investigación
Adauto, R., 2019	Comportamiento mecánico de una mezcla asfáltica en caliente con adición de ceniza de caña de maíz
Lavanya, P., Udaya, M., Anil, N. & Sanyasi, P., 2018	Experimental study on partial replacement of bitumen using corn cob ash (CCA) in bituminous mix
Li, et al, 2019	Effect of cornstalk ash on the microstructure of cement-based material under sulfate attack
Yi, J. & Feng, D., 2019	Preparation method of corn stalk fiber material and its performance investigation in asphalt concrete
Zagvozda, M., Dimter, S., Rukavina, T. & Netinger, I., 2017	Possibilities of bioash application in road building
Ahmed, A., et al., 2020	Optimum portland cement-guinea corn husk ash blend as filler in hot mix asphalt
Quoc, D., Van, N., Hoang, P. & Son, V., 2015	Thermogravimetric study on rice, corn and sugar cane crop residue
Suwanmaneechot, P., Nochaiya, T., & Julphunthong, P., 2015	Improvement, characterization and use of waste corn cob ash in cement-based materials

Nota: Autores, 2021.

Tabla 3

Estudios e investigaciones recopilados con adición de cenizas de carbón

Autor	Título de la investigación
Modarres, A., Rahmanzadeh, M. & Ayar, P., 2015	Effect of coal waste powder in hot mix asphalt compared to conventional fillers: mix mechanical properties and environmental impacts
Mistry, R. & Kumar, T., 2016	Effect of using fly ash as alternative filler in hot mix asphalt
Peña, J., 2019	Desempeño mecánico de la mezcla asfáltica en caliente incorporando cenizas volantes provenientes de la termoeléctrica de Ilo
Mirkovic, K., Tomic, N., & Mladenovi, G., 2019	Effect of different types of fly ash on properties of asphalt mixtures
Colonna, P., Berloco, N., Ranieri, V. & Shuler, S., 2012	Application of bottom ash for pavement binder course
Farooq, U., 2020	Impact of aggregate and fly ash filler types on asphalt and control mix designs
Katara, S., Modhiya, C. & Raval, N., 2014	Influence of modify bituminous mix with fly ash
Rahmanzadeh, M. & Modarres, A., 2014	Application of coal waste powder as filler in hot mix asphalt
Byung, Y., Dae, P. & Hai, V., 2016	Evaluation of asphalt mixture containing coal ash
Ramme, B., Covi, A., Faheem, A. & Sobolev, K., 2016	Fly Ash - An Important Ingredient for use in Hot-Mix ASHphalt Concrete
Vasudevan, G., 2017	Effect on Coal Bottom Ash in Hot Mix Asphalt (HMA) as Binder Course

Nota: Autores, 2021.

Se lograron recopilar un total de 29 investigaciones en las cuales se indican propiedades referentes a las mezclas asfálticas en caliente con adición de cenizas de cascara de arroz (10 investigaciones), caña de maíz (8 investigaciones) y carbón (11 investigaciones). Se debe indicar que el total de referencias citadas en este trabajo es mayor, sin embargo, las 29 investigaciones ilustradas en las tablas anteriores representan la fuente del conjunto de información cuantitativa plasmado en este trabajo.

2.3 Características físicas indicadas en los estudios recopilados

A continuación se describen las características más importantes referentes a los agregados naturales, agregados de reemplazo y asfalto empleados en las mezclas asfálticas en caliente. Es importante añadir, que no todos los estudios recopilados brindan información sobre cada característica a considerar, por lo tanto, en cada una de ellas se cita al autor de donde se obtuvieron los datos.

2.3.1 Granulometría de las mezclas asfálticas en caliente.

Las mezclas asfálticas en caliente son utilizadas principalmente para la conformación de capas de rodadura o capas inferiores, brindando una superficie cómoda, segura y económica en las vías. Este tipo de mezclas resultan de la combinación de los agregados (agregado grueso, agregado fino, y llenante mineral) mezclados con el cemento asfáltico o asfalto, a una temperatura que oscila entre los 135°C y los 185°C, de tal manera que se garantice la mayor adherencia posible entre el asfalto y los agregados (Rangel & Sarmiento, 2010).

El agregado grueso corresponde a los materiales pétreos cuyo tamaño es retenido en el tamiz No.4 (4,75 mm), el agregado fino corresponde al material pétreo que pasa el tamiz No.4 y es retenido en el tamiz No.200 (0,075 mm), y el llenante mineral o filler, es el material que pasa el tamiz No.200. La combinación de estos materiales representa la granulometría de la mezcla asfáltica (Lizcano & Ramos, 2020).

En las 3 tablas presentadas a continuación se muestra la granulometría indicada en los estudios recopilados para cada una de las cenizas estudiadas: cáscara de arroz, caña de maíz y carbón.

Tabla 4

Granulometría de los estudios recopilados con adición de cenizas de cáscara de arroz

Autor	% Pasa - Tamiz												
	N° 3/4"	N° 1/2"	N° 3/8"	N°4	N°8	N°10	N°16	N°30	N°40	N°50	N°80	N°100	N°200
	19,05 mm	12,7 mm	9,53 mm	4,75 mm	2,36 mm	2 mm	1,18 mm	0,6 mm	0,43 mm	0,36 mm	0,18 mm	0,15 mm	0,075 mm
Castillo, J., 2019	100	93,1	82,11	31,1	-	29,7	-	-	19,8	-	10,5	-	5
Shafabakhsh, G., Divandari, H. & Reza, S., 2018	100	95	78	59	43	-	-	-	-	13	-	-	6
Sargin, et al., 2013	100	97,2	79,28	58,6	41,5	-	-	-	26,4	-	11,96	-	8
Hoe, et al., 2014	100	85	74	57	49	-	34	-	22	-	-	11	7
Vijaya, A., Raj, A. & Dash, B., 2018	100	80	72	54	41	-	32	25	-	15	-	10	7
Mohiey, M., Mahdy, H. & Ibrahim, M. 2019	100	86,1	65,9	49	42,7	-	-	28,5	-	16,4	-	8,4	6,2

Nota: Autores, 2021.

Tabla 5

Granulometría de los estudios recopilados con adición de cenizas de caña de maíz

Autor	% Pasa - Tamiz												
	N° 3/4"	N° 1/2"	N° 3/8"	N°4	N°8	N°10	N°16	N°30	N°40	N°50	N°80	N°100	N°200
	19,05 mm	12,7 mm	9,53 mm	4,75 mm	2,36 mm	2 mm	1,18 mm	0,6 mm	0,43 mm	0,36 mm	0,18 mm	0,15 mm	0,075 mm
Adauto, R., 2019	100	90,7	80,2	57,5	-	42,1	-	-	26,7	-	12,5	-	5,7
Lavanya, P., Udaya, M., Anil, N. & Sanyasi, P., 2018	100	94	62	34	24	-	21	18	-	16	-	12	10
Yi, J. & Feng, D., 2019	100	91	67,4	30,7	23,5	-	20,2	16,8	-	15	-	13,9	10,3

Nota: Autores, 2021.

Tabla 6

Granulometría de los estudios recopilados con adición de cenizas de carbón

Autor	% Pasa - Tamiz												
	N° 3/4"	N° 1/2"	N° 3/8"	N°4	N°8	N°10	N°16	N°30	N°40	N°50	N°80	N°100	N°200
	19,05 mm	12,7 mm	9,53 mm	4,75 mm	2,36 mm	2 mm	1,18 mm	0,6 mm	0,43 mm	0,36 mm	0,18 mm	0,15 mm	0,075 mm
Modarres, A., Rahmanzadeh, M. & Ayar, P., 2015	100	95	75	60	41	-	-	-	-	11	-	-	7
Peña, J., 2019	100	88,8	78,2	58,5	-	42,8	-	-	26,4	-	11,3	-	5,8

Nota: Autores, 2021.

Las granulometrías anteriores fueron elaboradas por los distintos autores con el fin de cumplir con los requerimientos para la elaboración de mezclas asfálticas en caliente. Todos los autores reportan que se buscó fabricar una mezcla de gradación continua, es decir, con diferentes tamaños de agregado pétreo, además de un bajo contenido de vacíos de aire, por lo que corresponden al tipo densas. De acuerdo a lo establecido en el Artículo 450 “*Mezclas asfálticas en caliente de gradación continua (concreto asfáltico)*”, del Instituto Nacional de Vías (INVIAS,

2012), las mezclas corresponden al tipo MDC (mezclas densas), y dado que el tamiz por el cual pasa el 100% del material granular es el No. ¾" (19 mm), todas las mezclas son del tipo MDC-19. En la tabla 7 se muestra las franjas granulométricas para las mezclas MDC-19 indicadas en la tabla 450-6 del Artículo 450 del INVIAS (INVIAS, 2012).

Tabla 7

Franjas granulométricas para mezclas densas tipo MDC-19 indicadas en el Artículo 450 del INVIAS

Tipo de Mezcla	% Pasa - Tamiz							
	N° ¾"	N° 1/2"	N° 3/8"	N°4	N°10	N°40	N°80	N°200
	19,05 mm	12,7 mm	9,53 mm	4,75 mm	2 mm	0,43 mm	0,18 mm	0,075 mm
MDC-19	100	80-95	70-88	49-65	29-45	14-25	8-17.	4-8.

Nota: Autores, 2021.

Con el fin de ilustrar las granulometrías presentadas en las tablas anteriores, en las tres figuras siguientes se plasman los gráficos de las granulometrías de los estudios recopilados.

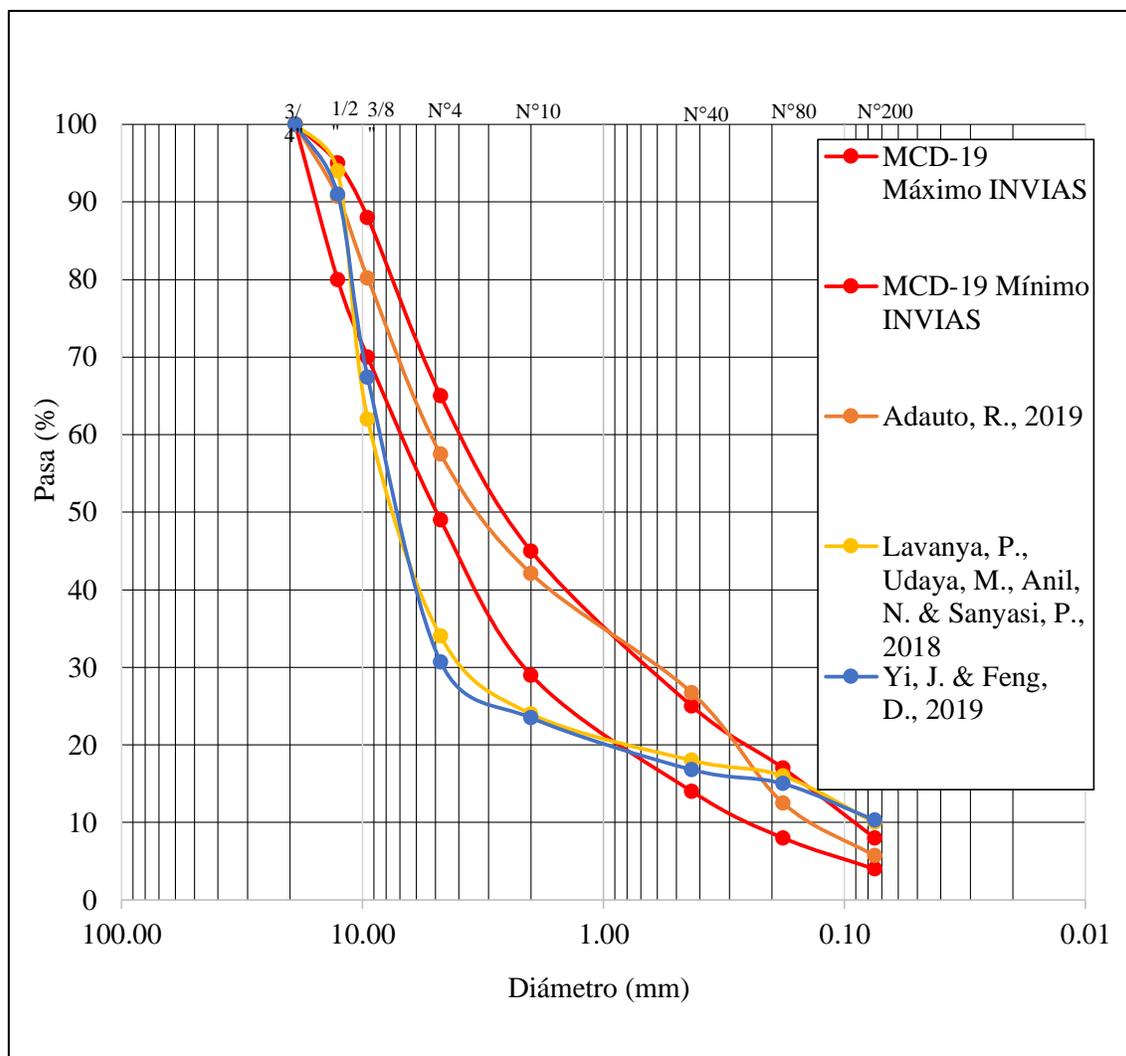


Figura 4. Gráfico granulométrico mezclas asfálticas en caliente con adición de cenizas de cáscara de arroz. Autores, 2020.

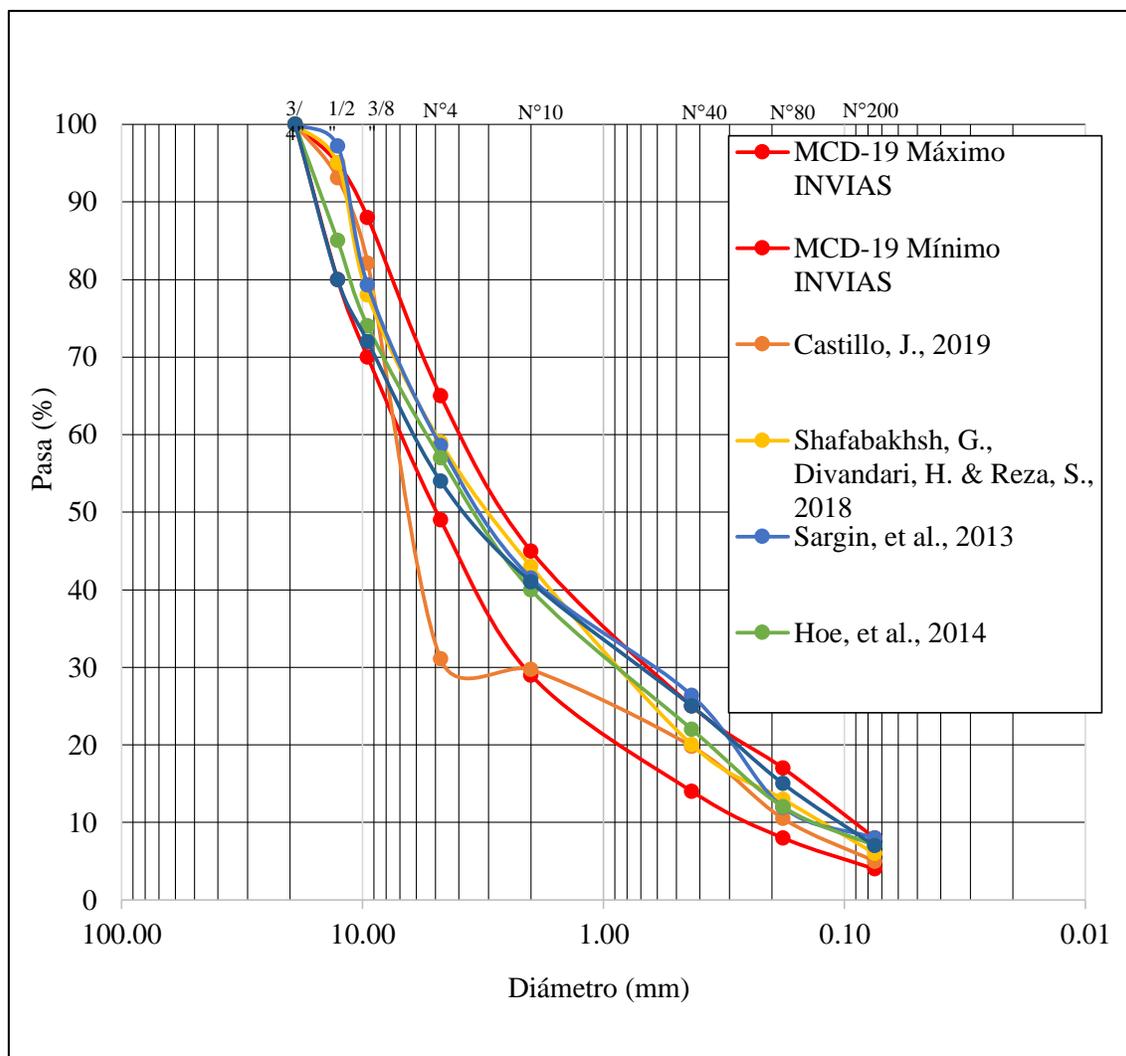


Figura 5. Gráfico granulometría mezclas asfálticas en caliente con adición de cenizas de caña de maíz. Autores, 2020.

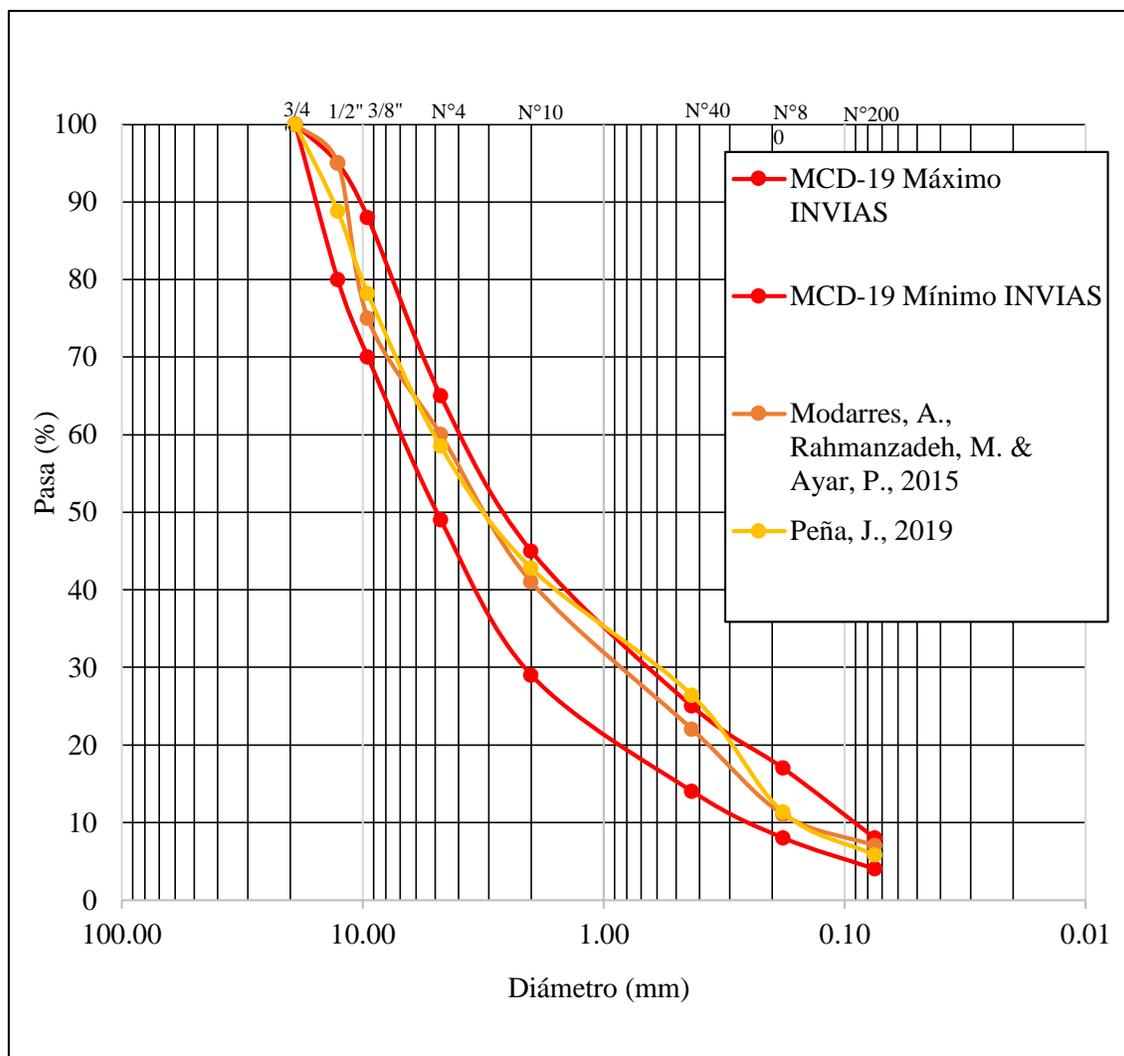


Figura 6. Gráfico granulométrico mezclas asfálticas en caliente con adición de cenizas de carbón. Autores, 2020.

Se puede observar en los tres gráficos que la mayor parte de las granulometrías de las mezclas asfálticas en caliente elaboradas corresponden con los límites de las mezclas densas tipo MCD-19, excepto en 2 referencias de las cenizas de cáscara de arroz (Lavanya, P., Udaya, M, Anil, N. & Sanyasi, P., 2018, y Yi, J. & Feng, D., 2019) donde se presentan valores por debajo de los valores mínimos entre los tamices 3/8" y N°40. También se presenta una leve variación en el porcentaje de pasa del tamiz N°4 en las cenizas de caña de maíz, en el caso específico de Shafabakhsh, G., Divandari, H. & Reza, S., 2018.

2.3.2 Granulometría de las cenizas adicionadas en las mezclas asfálticas en caliente

Las cenizas se caracterizan por ser un material con alto contenido de finos, generalmente la totalidad de las muestras tienen un 100% de pasa tamiz No.200. Por tal razón, en los estudios recopilados se tiende a no caracterizar la granulometría de las cenizas, sin embargo, en todos se indica que la ceniza utilizada pasa en su totalidad, o por lo menos el 95%, en el tamiz No.200.

2.3.3 Contenido de cenizas adicionadas en las mezclas asfálticas en caliente

El objetivo principal de los distintos estudios recopilados está enfocado en determinar el porcentaje de ceniza óptimo que debe ser adicionado en la mezcla, y que permita mejorar las propiedades de la misma, o por lo menos, ser iguales a las de una mezcla asfáltica convencional, con lo cual se reduce el uso de materiales comúnmente usados como llenante mineral: cal y cemento.

Por lo anterior, en las 3 tablas siguientes se ilustra el porcentaje de ceniza (cáscara de arroz, caña de maíz y carbón) que cada autor reportó como óptimo en la mezcla asfáltica. Esta información permitirá realizar análisis adicionales como se indica en los capítulos siguientes.

Tabla 8

Contenido óptimo de ceniza de cáscara de arroz en la mezcla asfáltica en caliente indicado en los estudios recopilados

Autor	Contenido óptimo de ceniza (%)
Castillo, J., 2019	4,00
Lizcano, O. & Ramos, D., 2020	3,00
Shafabakhsh, G., Divandari, H. & Reza, S., 2018	3,00
Sargin, et al., 2013	2,50
Hoe, et al., 2014	3,75
Vijaya, A., Raj, A. & Dash, B., 2018	4,00
Banerjee, J., Ahmed, J. & Rajbongshi, P., 2016	2,00
Putra, R., et al., 2019	6,00
Mohiey, M., Mahdy, H. & Ibrahim, M. 2019	4,00

Nota: Autores, 2021.

Tabla 9

Contenido óptimo de ceniza de caña de maíz en la mezcla asfáltica en caliente indicado en los estudios recopilados

Autor	Contenido óptimo de ceniza (%)
Adauto, R., 2019	0,50
Lavanya, P., Udaya, M., Anil, N. & Sanyasi, P., 2018	8,20
Yi, J. & Feng, D., 2019	0,60
Ahmed, A., et al., 2020	6,00

Nota: Autores, 2021.

Tabla 10

Contenido óptimo de ceniza de carbón en la mezcla asfáltica en caliente indicado en los estudios recopilados

Autor	Contenido óptimo de ceniza (%)
Modarres, A., Rahmanzadeh, M. & Ayar, P., 2015	7,00
Mistry, R. & Kumar, T., 2016	4,00
Peña, J., 2019	0,50
Mirkovic, K., Tosic, N., & Mladenovi, G., 2019	2,00

Nota: Autores, 2021.

Se observa en las tablas anteriores lo siguiente: la cáscara de arroz tiene los porcentajes óptimos recomendados más cercanos entre cada estudio, como un valor mínimo de 2,5% y un máximo de 6%. Por otra parte, la caña de maíz y el carbón presentan la mayor variación entre los porcentajes recomendados, para ambas cenizas el valor mínimo recomendado está en 0,5%, mientras que el valor máximo recomendado es de 8,2% para la caña de maíz, y de 7% para el carbón.

2.3.4 Contenido de asfalto adicionado en las mezclas asfálticas en caliente.

El asfalto, o también llamado material bituminoso, consiste en una sustancia de color negro que se caracteriza por su alta viscosidad con una consistencia variable. Se origina a partir del procesamiento de hidrocarburos pesados como el petróleo, aunque también se encuentra en yacimientos naturales. Su principal función es actuar como aglomerante en las mezclas

asfálticas, es decir, unir las partículas de los materiales (agregados) de tal forma que se garantice su adherencia al mismo tiempo que soporte las cargas a las cuales va a estar sometida (Meneses & Páez, 2017).

Con el fin de determinar la causa de la variación sustancial en los contenidos óptimos de ceniza recomendados en cada estudio, principalmente para la caña de maíz y el carbón, a continuación se presentan los contenidos de asfaltos que correspondieron para cada porcentaje de ceniza, y la clasificación de cada asfalto de acuerdo a su grado de penetración.

2.3.4.1 Cenizas de cáscara de arroz.

Tabla 11

Contenido de ceniza óptimo y de asfalto indicado para las mezclas asfálticas en caliente con adición de cenizas de cáscara de arroz

Autor	Contenido óptimo de ceniza (%)	Contenido óptimo de asfalto en la mezcla asfáltica (%)	Grado de penetración del asfalto indicado por el autor del estudio
Castillo, J., 2019	4,00	5,0	60-70
Lizcano, O. & Ramos, D., 2020	3,00	5,5	60-70
Shafabakhsh, G., Divandari, H. & Reza, S., 2018	3,00	4,5	60-70
Sargin, et al., 2013	2,50	4,7	85-100
Hoe, et al., 2014	3,75	5,5	70-80
Vijaya, A., Raj, A. & Dash, B., 2018	4,00	5,0	70-80

Nota: Autores, 2021.

Continuación tabla 11

Autor	Contenido óptimo de ceniza (%)	Contenido óptimo de asfalto en la mezcla asfáltica (%)	Grado de penetración del asfalto indicado por el autor del estudio
Banerjee, J., Ahmed, J. & Rajbongshi, P., 2016	2,00	5,0	80-100
Putra, R., et al., 2019	6,00	5,0	60-70
Mohiey, M., Mahdy, H. & Ibrahim, M. 2019	4,00	5,0	80-100

Nota: Autores, 2021.

Se observa en la tabla 11 que el contenido óptimo de ceniza no tiende a variar de acuerdo al contenido de asfalto presente en la mezcla, pues los porcentajes de asfalto tienden a ser muy similares en todos los estudios. Sin embargo, se evidencia que el grado de penetración del asfalto si tiende a correlacionarse con el contenido óptimo de ceniza. De forma general, se observa que entre mayor sea el grado de penetración del asfalto, menor es el contenido de ceniza requerido en la mezcla asfáltica en caliente. En el gráfico de la figura 7 se muestra en mejor detalle esta observación.

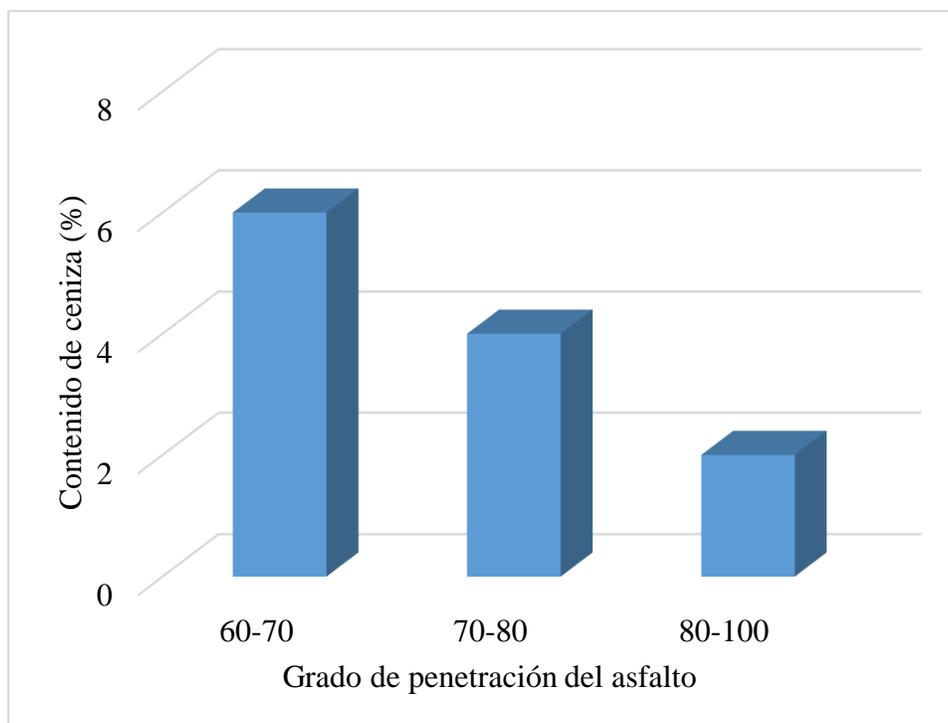


Figura 7. Gráfico de la correlación entre el contenido óptimo de ceniza de cáscara de arroz y el grado de penetración del asfalto. Autores, 2020.

2.3.4.2 Cenizas de caña de maíz.

Tabla 12

Contenido de ceniza óptimo y de asfalto indicado para las mezclas asfálticas en caliente con adición de cenizas de caña de maíz

Autor	Contenido óptimo de ceniza (%)	Contenido óptimo de asfalto en la mezcla asfáltica (%)	Grado de penetración del asfalto indicado por el autor del estudio
Adauto, R., 2019	0,50	6	85-100
Lavanya, P., Udaya, M., Anil, N. & Sanyasi, P., 2018	8,20	5	50-70
Yi, J. & Feng, D., 2019	0,60	6	80-100
Ahmed, A., et al., 2020	6,00	5,80	60-70

Nota: Autores, 2021.

Se observa en la tabla 12, que al igual que en el caso de las cenizas de cáscara de arroz, el contenido óptimo de cenizas de caña de maíz se relaciona con el grado de penetración del cemento asfáltico. Entre mayor grado de penetración, menor contenido de ceniza se requiere en la mezcla, como se ilustra en la figura 8.

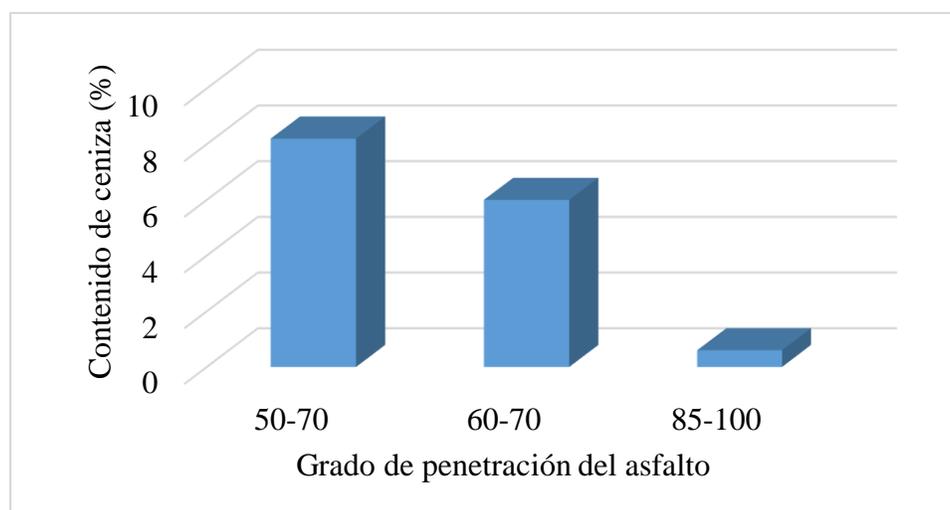


Figura 8. Gráfico de la correlación entre el contenido óptimo de ceniza de caña de maíz y el grado de penetración del asfalto. Autores, 2020.

2.3.4.3 Cenizas de carbón.

Tabla 13

Contenido de ceniza óptimo y de asfalto indicado para las mezclas asfálticas en caliente con adición de cenizas de carbón

Autor	Contenido óptimo de ceniza (%)	Contenido óptimo de asfalto en la mezcla asfáltica (%)	Grado de penetración del asfalto indicado por el autor del estudio
Modarres, A., Rahmanzadeh, M. & Ayar, P., 2015	7,00	5,2	50-70
Mistry, R. & Kumar, T., 2016	4,00	5	60-70
Peña, J., 2019	0,50	6	85-100
Mirkovic, K., Tosic, N., & Mladenovi, G., 2019	2,00	5,60	85-100

Nota: Autores, 2021.

Se observa en la tabla 13, que las cenizas de carbón presentan la misma tendencia de las cenizas de cáscara de arroz y caña de maíz, entre mayor grado de penetración tenga el asfalto menor contenido de ceniza se requiere, como ilustra en el gráfico de la figura 9.

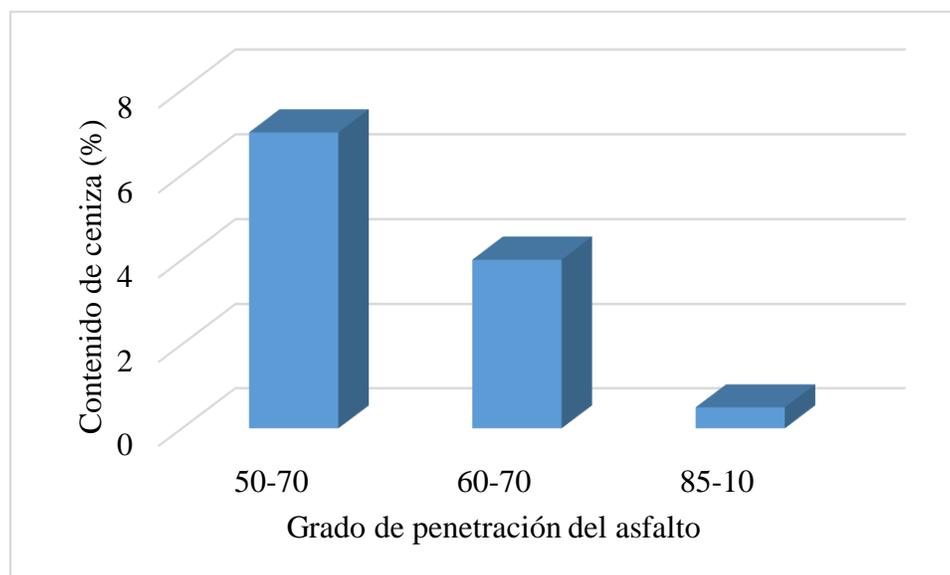


Figura 9. Gráfico de la correlación entre el contenido óptimo de ceniza de carbón y el grado de penetración del asfalto. Autores, 2020.

2.3.5 Densidad de las mezclas asfálticas en caliente con adición de cenizas.

La densidad en las mezclas asfálticas en caliente está definida como su peso unitario, es decir, como el peso de un volumen específico de mezcla. La densidad puede ser calculada mediante el procedimiento de ensayo descrito en la ASTM D-2041 (*Standard test method for theoretical maximum specific gravity and density of bituminous paving mixtures*) Método de ensayo estándar de densidad teórica máxima de mezclas de pavimentación bituminosa. En Colombia se puede aplicar la I.N.V. E- 802 *Determinación de la gravedad específica bulk y de la*

densidad de mezclas asfálticas compactadas mediante el método de sellado automático por vacío (Suriano, 2018; Aduato, 2019).

A continuación se muestran los resultados recopilados referentes a esta propiedad con cada una de las cenizas estudiadas:

2.3.5.1 Cenizas de cáscara de arroz.

Tabla 14

Resultados de la densidad de mezclas asfálticas en caliente con adición de ceniza de cáscara de arroz

Autor	Unidad	Porcentaje de ceniza adicionado								
		0	1,25	2,00	2,50	3,75	4,00	5,00	6,00	
Hoe, et al., 2014		2,16	2,15	-	2,13	2,10	-	2,01	-	
Putra, R., et al., 2019	gr/cm ³	2,29	-	2,28	-	-	2,26	-	2,20	
Mohiey, M., Mahdy, H. & Ibrahim, M. 2019		2,31	-	2,31	-	-	2,29	-	2,25	

Nota: Autores, 2021.

Se observa en la tabla 14 que la adición de cenizas de cáscara de arroz representa una disminución de la densidad en la mezcla asfáltica en caliente. En el gráfico de la figura 10 se ilustran los datos de esta tabla.

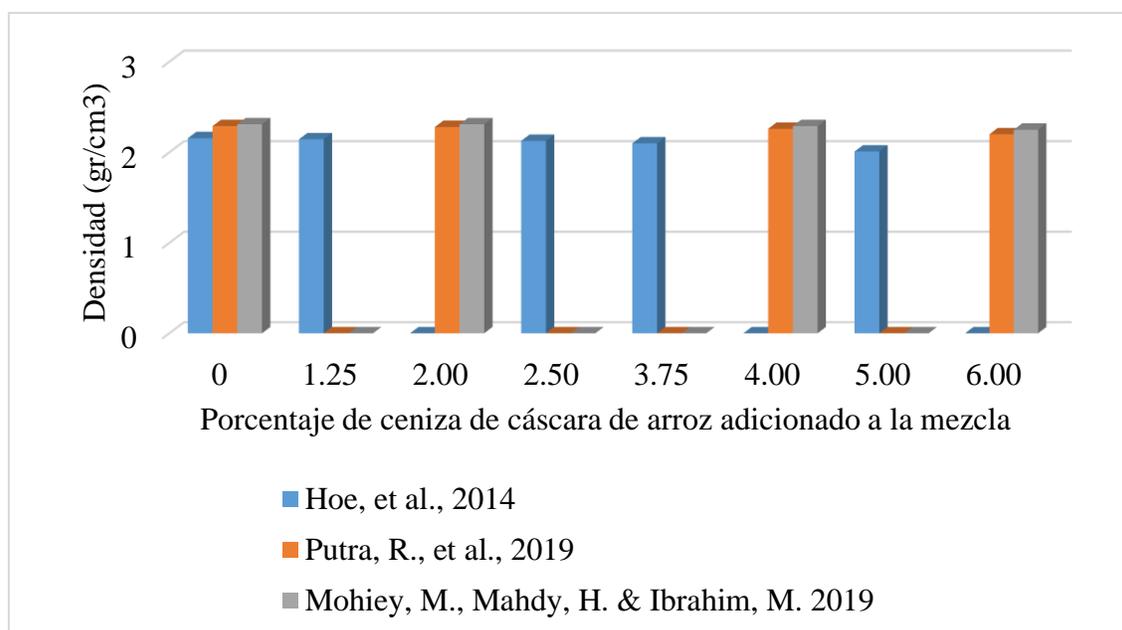


Figura 10. Gráfico de la densidad de mezclas asfálticas en caliente con adición de ceniza de cáscara de arroz. Autores, 2021.

2.3.5.2 Cenizas de caña de maíz.

Tabla 15

Resultados de la densidad de mezclas asfálticas en caliente con adición de ceniza de caña de maíz

Autor	Unidad	Porcentaje de ceniza adicionado												
		0	0,3	0,6	0,9	2,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	11,0	13,0
Lavanya, P., Udaya, M., Anil, N. & Sanyasi, P., 2018		2,53	-	-	-	-	-	2,48	-	2,50	-	2,52	2,53	2,52
Yi, J. & Feng, D., 2019	gr/cm ³	2,41	2,37	2,36	2,36	2,25	2,22	-	2,23	-	2,23	-	-	-
Ahmed, A., et al., 2020		2,29	-	-	-	2,26	2,20	-	2,16	-	2,11	-	-	-

Nota: Autores, 2021.

Se observa en la tabla 15 que la adición de cenizas de caña de maíz representa, al igual que en las cenizas de cáscara de arroz, una disminución de la densidad en la mezcla asfáltica en caliente. En el gráfico de la figura 11 se ilustran los datos de esta tabla.

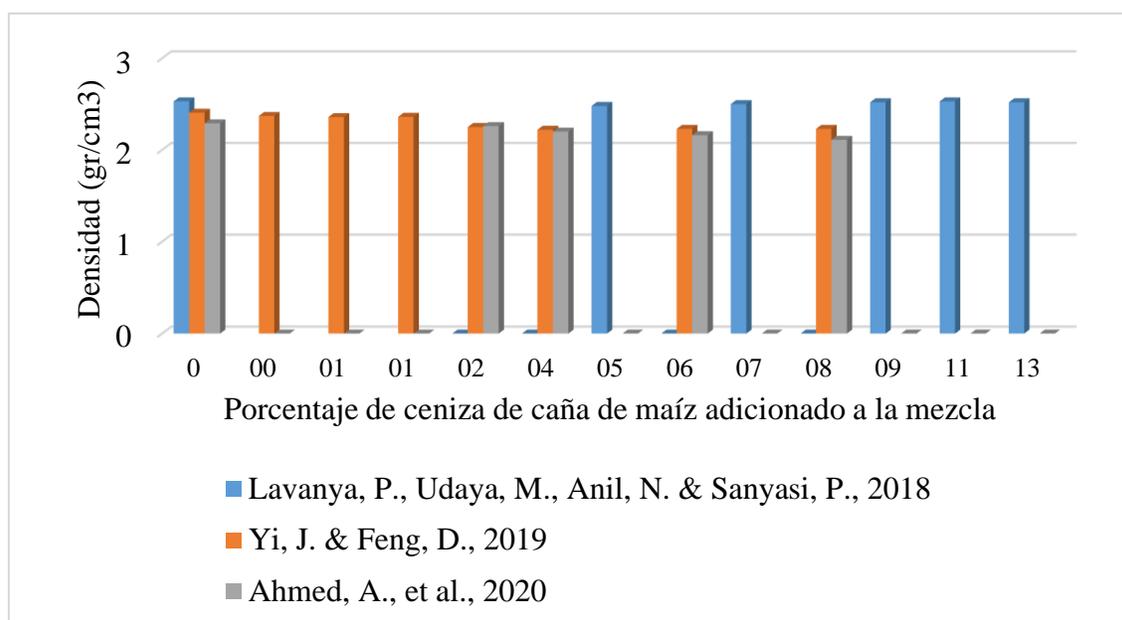


Figura 11. Gráfico de la densidad de mezclas asfálticas en caliente con adición de ceniza de caña de maíz. Autores, 2021.

2.3.5.3 Cenizas de carbón.

Tabla 16

Resultados de la densidad de mezclas asfálticas en caliente con adición de ceniza de carbón

Autor	Unidad	Porcentaje de ceniza adicionado					
		0	1,0	2,0	3,0	4,0	7,0
Modarres, A., Rahmanzadeh, M. & Ayar, P., 2015	gr/cm ³	2,353	-	-	-	-	2,34
Mirkovic, K., Tosic, N., & Mladenovi, G., 2019		2,371	2,35	2,31	2,30	2,28	-

Nota: Autores, 2021.

Se observa en la tabla 16 que la adición de cenizas de carbón, al igual que las otras dos cenizas, representa una disminución de la densidad en la mezcla asfáltica en caliente. En el gráfico de la figura 12 se ilustran los datos de esta tabla.

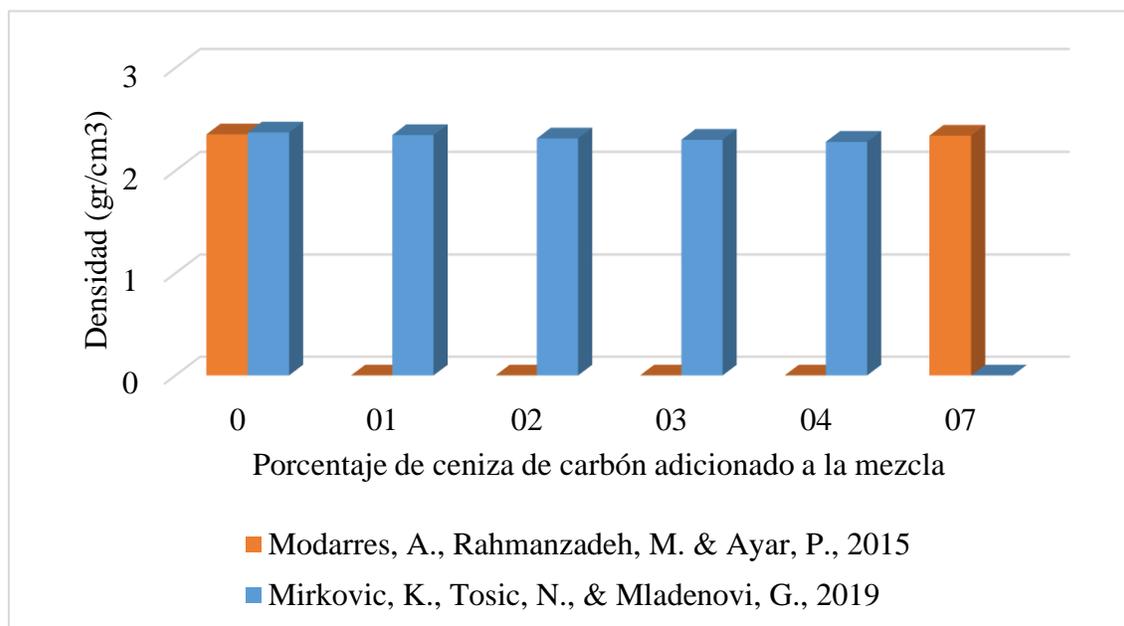


Figura 12. Gráfico de la densidad de mezclas asfálticas en caliente con adición de ceniza de carbón. Autores, 2021.

2.3.5.4 Efecto general de las cenizas sobre la densidad.

Como se observa en los datos recopilados referentes a la densidad de las mezclas asfálticas en caliente, la adición de los tres tipos de cenizas representa una disminución de esta propiedad. La ceniza de cáscara de arroz produce la mayor disminución de la densidad como un valor promedio de 2,85%, seguido de la ceniza de carbón con un 2,18%, y por último la ceniza de caña de maíz con 1,16%. Esta reducción en términos generales indica que la mezcla asfáltica en caliente se vuelve más liviana. En el gráfico de la figura 13 se ilustra el porcentaje promedio de disminución de la densidad con cada tipo de ceniza.

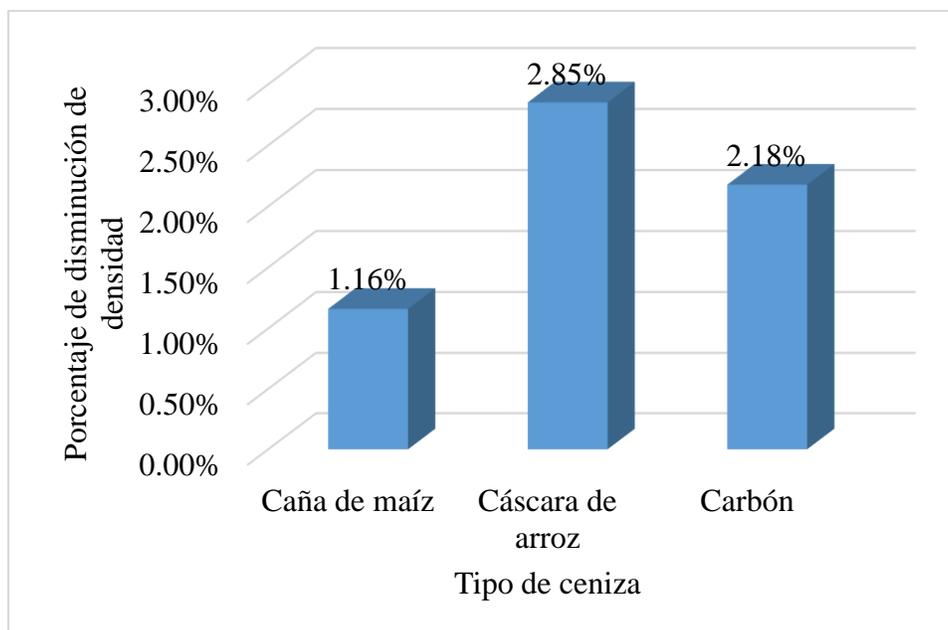


Figura 13. Porcentaje de disminución de la densidad con adición de ceniza. Autores, 2021.

2.3.6 Contenido de vacíos de aire de las mezclas asfálticas en caliente con adición de cenizas.

Los vacíos de aire, o simplemente vacíos, son los espacios o bolsas de aire que están presentes entre los agregados revestidos de asfalto en la mezcla asfáltica en caliente en su estado compactado. Los vacíos son importantes ya que proporcionan los espacios suficientes para que el asfalto pueda fluir cuando se inicie la compactación adicional debida al tráfico vehicular. Este valor puede calcularse mediante los procedimientos descritos en la ASTM D-3203 *Porcentaje de vacíos con aire en mezclas bituminosas densas y abiertas*. La norma aplicable para Colombia es la I.N.V. E-736 *Porcentaje de vacíos con aire en mezclas asfálticas compactadas densas y abiertas* (Suriano, 2018; Adatao, 2019)..

A continuación se muestran los resultados recopilados referentes a esta propiedad con cada una de las cenizas estudiadas:

2.3.6.1 Cenizas de cáscara de arroz.

Tabla 17

Contenido de vacíos de aire en las mezclas asfálticas en caliente con adición de ceniza de cáscara de arroz. Autores, 2021.

Autor	Unidad	Porcentaje de ceniza adicionado												
		0	1,3	1,5	2	2,5	3	3,8	4	4,5	5	6	11	
Castillo, J., 2019		4,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4,7
Shafabakhsh, G., Divandari, H. & Reza, S., 2018		3,89	-	3,9	-	-	4,1	-	-	4,7	-	5,7	-	
Sargin, et al., 2013		6,1	6,5	-	-	8,2	-	11	-	-	12	-	-	
Hoe, et al., 2014	%	3,5	3,7	-	-	3,9	-	3,9	-	-	4	-	-	
Vijaya, A., Raj, A. & Dash, B., 2018		3,12	-	-	3,7	-	-	-	4,7	-	-	-	-	
Mohiey, M., Mahdy, H. & Ibrahim, M. 2019		4,27	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5,5	

Nota: Autores, 2021.

Se observa en los datos recopilados en la tabla 17, que la adición de cenizas de cáscara de arroz produce un aumento en el contenido de vacíos de aire en las mezclas asfálticas en caliente. En el gráfico de la figura 14 se ilustran estos resultados.

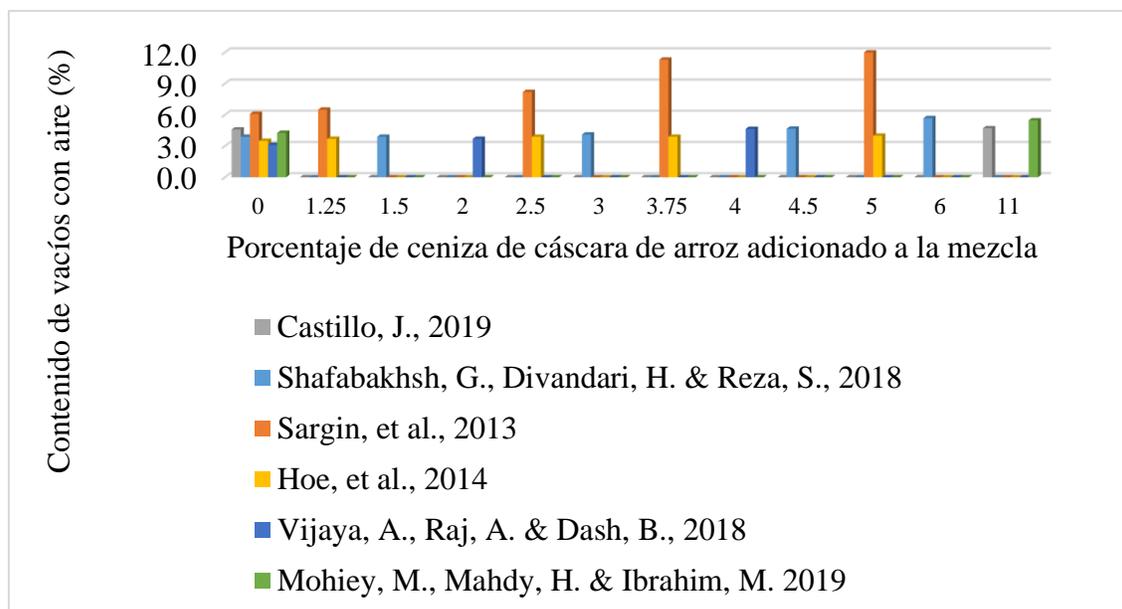


Figura 14. Gráfico del contenido de vacíos de aire de las mezclas asfálticas en caliente con adición de ceniza de cáscara de arroz. Autores, 2021.

2.3.6.2 Cenizas de caña de maíz.

Tabla 18

Contenido de vacíos de aire en las mezclas asfálticas en caliente con adición de ceniza de caña de maíz. Autores, 2021.

Autor	Unidad	Porcentaje de ceniza adicionado																
		0	0,2	0,3	0,5	0,6	0,9	1	2	3	4	5	6	7	8	9	11	13
Adauto, R., 2019		3,5	3,5	-	3,6	-	-	3,8	3,7	3,9	4,2	-	-	-	-	-	-	-
Lavanya, P., Udaya, M., Anil, N. & Sanyasi, P., 2018	%	2,35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4	3,8	-	3	3,2	3,5	
Yi, J. & Feng, D., 2019		3,33	-	3,6	-	3,62	3,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Ahmed, A., et al., 2020		4,9	-	-	-	-	-	-	6,2	-	7,6	-	6	-	6,2	-	-	

Nota: Autores, 2021.

Se observa en los datos recopilados en la tabla 18, que la adición de cenizas de caña de maíz, al igual que las de cáscara de arroz, produce un aumento en el contenido de vacíos de aire en las mezclas asfálticas en caliente. En el gráfico de la figura 15 se ilustran estos resultados.

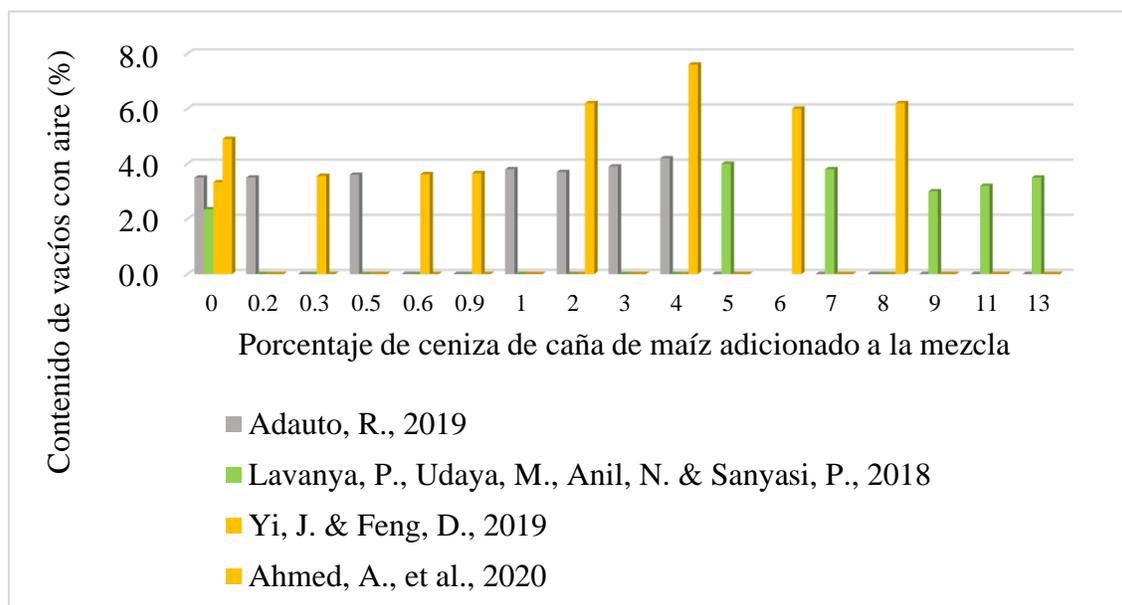


Figura 15. Gráfico del contenido de vacíos de aire de las mezclas asfálticas en caliente con adición de ceniza de caña de maíz. Autores, 2021.

2.3.6.3 Cenizas de carbón.

Tabla 19

Contenido de vacíos de aire en las mezclas asfálticas en caliente con adición de ceniza de carbón. Autores, 2021.

Autor	Unidad	Porcentaje de ceniza adicionado								
		0	1	2	3	4	6	7	8	
Modarres, A., Rahmanzadeh, M. & Ayar, P., 2015		5,48	-	-	-	-	-	5,5	-	
Mistry, R. & Kumar, T., 2016	%	4,1	-	4,2	-	4,1	4,2	-	4,6	
Mirkovic, K., Tosic, N., & Mladenovi, G., 2019		4,7	5,5	6,7	7,1	7,7	-	-	-	

Nota: Autores, 2021.

Se observa en los datos recopilados en la tabla 19, que la adición de cenizas de carbón, al igual que la dos cenizas anteriores, produce un aumento en el contenido de vacíos de aire en las mezclas asfálticas en caliente. En el gráfico de la figura 16 se ilustran estos resultados.

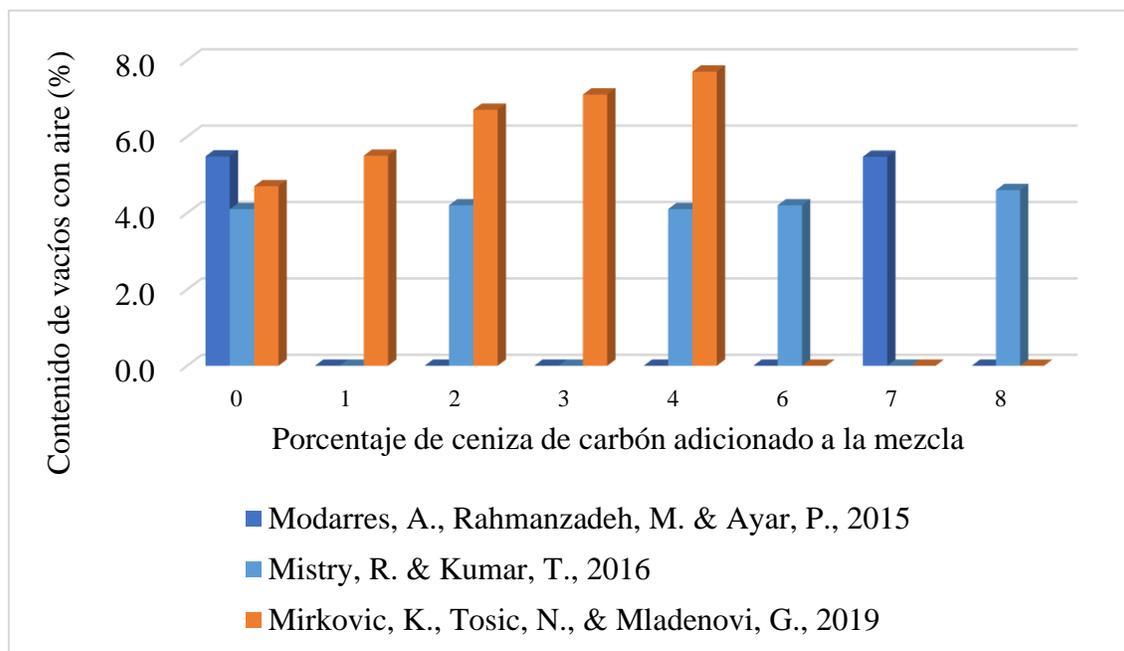


Figura 16. Gráfico del contenido de vacíos de aire de las mezclas asfálticas en caliente con adición de ceniza de carbón. Autores, 2021.

2.3.6.4 Efecto general de las cenizas sobre el contenido de vacíos de aire.

Los datos recopilados referentes al contenido de vacíos con aire de las mezclas asfálticas en caliente, indican que esta propiedad aumenta con la adición de cualquiera de las tres cenizas estudiadas. La ceniza que mayor aumento del contenido de vacíos produce es la de la cáscara de arroz, con un 27,19%, seguido de la ceniza de caña de maíz con un 23%, y finalmente la ceniza de carbón con un 21,26%. Este aumento en el contenido de vacíos con aire puede resultar

negativa, ya que las mezclas asfálticas en caliente deben ajustarse a un rango establecido. En el gráfico de la figura 17 se muestran los porcentajes de aumento.

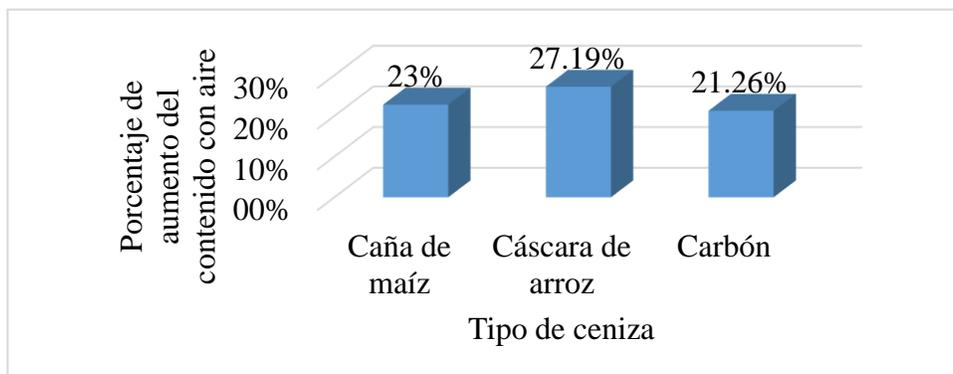


Figura 17. Porcentaje de aumento del contenido de vacíos de aire en las mezclas asfálticas en caliente con adición de ceniza. Autores, 2021.

El tipo de mezclas recopiladas en este trabajo, las cuales corresponden a mezclas densas del tipo MCD-19, permiten un contenido de vacíos con aire comprendido entre un 3 a 6%. De esto se deduce que varios de los autores citados publicaron resultados por encima del rango aceptado, sin embargo, el propósito de los estudios se concentró en determinar la variación que producen las cenizas en la mezcla.

Capítulo 3. Propiedades químicas de los agregados de reemplazo

Las cenizas abordadas en este trabajo (cáscara de arroz, caña de maíz y carbón) suelen enmarcarse dentro de las denominadas cenizas volantes, por lo tanto, puede aplicarse la normativa y las clasificaciones correspondientes a este conjunto. En la norma ASTM C-618-08^a *Coal fly and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete (Especificación estándar para ceniza volante de carbón y de puzolana natural calcinada para uso en el concreto)*, se muestran las distintas clasificaciones de las cenizas volantes y las características químicas que cada una de ellas debe poseer para emplearse como material de relleno o filler (ASTM C-618-08a, 2008).

De acuerdo a la ASTM C-618-08^a se distinguen tres tipos de cenizas, las de clasificación C, F, y N. Las tipo C, son aquellas cenizas que presentan propiedades puzolánicas y cementantes, las cuales contienen grandes cantidades de cal, entre un 15 a 30%, y generalmente son producidas por calcinación del carbón. Las tipo F, son aquellas cenizas que presentan propiedades puzolánicas, pero que contienen cantidades de cal inferiores al 15%, son producidas por calcinación del carbón. Por último, las tipo N, son las cenizas de materiales de origen natural, entre ellas tovas, diatomitas, ceniza volcánica y materiales de origen agrícola, las cuales pueden o no estar calcinadas (ASTM C-618-08a, 2008; Suriano, 2018).

El término puzolana, hace referencia a aquellos materiales con alto contenido de sílice o silíceo, el cual al ser sometido a condiciones de húmeda a temperatura ordinaria, reacciona químicamente de tal forma que adquiere propiedades cementantes. Esta puzolana puede ser de

origen natural, como en el caso de las cenizas volcánicas, o artificial, como las cenizas volantes, pues éstas se generan a través de procesos de calcinación o incineración. Las propiedades cementantes de las puzolanas confieren mayor resistencia a las mezclas asfálticas (ASTM C-618-08a, 2008; Suriano, 2018).

Por lo anterior, una de las formas de evaluar si una ceniza es adecuada o no para actuar como material de relleno, ya sea en el cemento o en mezclas asfálticas, es determinando su composición química. Para lograr esto, se suelen realizar ensayos de fluorescencia de rayos X, o también conocida como prueba XRF (por sus siglas en inglés). Con este ensayo se logra conocer la composición química de una amplia variedad de materiales, incluyendo sólidos, líquidos, y polvos sueltos, como las cenizas (Sargin, et al., 2013; Castillo, 2019).

3.1 Ensayos de fluorescencia de rayos X en las cenizas

La fluorescencia de rayos X o XRF, es una técnica con la cual es posible determinar los elementos que componen una muestra a partir de la lectura de la emisión de rayos X secundarios o fluorescentes que son emitidos desde la muestra luego de que ésta ha sido expuesta a la irradiación de rayos X primarios. Cuando los rayos X primarios provenientes de un tubo de rayos X o de una fuente radiactiva golpean una muestra, los rayos X pueden absorberse por el átomo o puede esparcirse a través del material. Si durante este proceso, los rayos X primarios tienen suficiente energía, los electrones son expulsados de los niveles internos, creando vacancias, estas vacancias se llenan con electrones de los niveles exteriores y en el proceso emite rayos X

característicos cuya energía es la diferencia entre los niveles de energía transferidos. Dado que cada elemento tiene niveles de energía característicos, cada elemento produce rayos X característicos, permitiendo así medir la composición elemental de una muestra sin destruirla. En la figura 18 se observa el equipo empleado para realizar este tipo de ensayos (De la Cruz, 2018).



Figura 18. Equipo de fluorescencia de rayos X o XRF. Obtenido en: <https://www.rptechlab.com/producto/fluorescencia-de-rayos-x-wdxf-marca-rigaku-zsx-primus/>

Entre los minerales que pueden determinarse en las cenizas volantes a través de ensayos de fluorescencia de rayos X o XRF, están: sílice, alúmina, hierro, cal, magnesia, manganeso, potasio y sodio. En las tablas siguientes se muestran los resultados de esta prueba que fueron presentados en los estudios recopilados en la presente investigación para cada una de las cenizas consideradas (Bautista, Díaz, & Martínez, 2017).

Tabla 20

Resultado de la composición química de las cenizas de cáscara de arroz recopiladas

Autor	Unidad	Mineral							
		Silice	Alúmina	Hierro	Cal	Magnesia	Manganeso	Potasio	Sodio
Castillo, J., 2019		97,09	1,88	0,21	0,94	0,20	0,19	3,96	0,01
Shafabakhsh, G., Divandari, H. & Reza, S., 2018		88,00	0,48	3,83	0,73	0,51	0,17	1,62	-
Sargin, et al., 2013	%	90,89	0,93	0,47	1,25	0,81	0,17	2,34	-
Akter, R. & Hossain, K., 2017		93,29	0,57	0,57	1,13	0,61	0,21	2,31	0,00
Mohiey, M., Mahdy, H. & Ibrahim, M. 2019		82,30	4,05	1,64	9,54	2,08	0,25	3,8	-

Nota: Autores, 2021.

Tabla 21

Resultado de la composición química de las cenizas de caña de maíz recopiladas

Autor	Unidad	Mineral							
		Silice	Alúmina	Hierro	Cal	Magnesia	Manganeso	Potasio	Sodio
Lavanya, P., Udaya, M., Anil, N. & Sanyasi, P., 2018		57,78	9,40	8,31	6,70	7,80	2,70	5,42	1,89
Li, et al, 2019		64,80	9,42	2,88	4,95	5,06	2,31	6,50	-
Ahmed, A., et al., 2020	%	72,18	7,00	6,20	3,57	5,40	2,80	7,62	1,62
Suwanmaneechot, P., Nochaiya, T., & Julphunthong, P., 2015		63,91	4,01	3,95	4,13	2,91	2,82	12,12	-

Nota: Autores, 2021.

Tabla 22

Resultado de la composición química de las cenizas de carbón recopiladas

Autor	Unidad	Mineral							
		Silice	Alúmina	Hierro	Cal	Magnesia	Manganeso	Potasio	Sodio
Modarres, A., Rahmanzadeh, M. & Ayar, P., 2015		55,63	23,25	8,09	2,28	1,54	-	3,96	0,49
Mistry, R. & Kumar, T., 2016		49,60	25,30	4,80	12,30	1,40	-	2,40	-
Peña, J., 2019	%	54,32	25,36	0,18	1,18	0,03	-	1,93	1,27
Mirkovic, K., Tosic, N., & Mladenovi, G., 2019		52,83	22,14	0,22	2,11	0,9	-	1,2	-
Rahmanzadeh, M. & Modarres, A., 2014		52,24	14,43	3,89	0,05	0,02	-	2,39	0,27

Nota: Autores, 2021.

La primera diferencia evidente en los datos anteriores, es la ausencia de manganeso en las cenizas de carbón, es todo se debe a que las cenizas del carbón provienen de un material inorgánico, el carbón, a diferencias de las otras dos cenizas cuyo origen es un material orgánico: cáscara de arroz y caña de maíz.

Del conjunto de minerales mostrados en las tres tablas anteriores, los que permiten determinar si un material tiene potencial como material de filler o llenante mineral son cuatro: sílice, alúmina, hierro y cal. Estos minerales permiten establecer el denominado comportamiento puzolánico de cada ceniza (Rangel & Sarmiento, 2010).

Este comportamiento puzolánico, es el que indica la capacidad que tiene un material (en este caso cenizas), para formar reacciones químicas con el hidróxido de calcio (Cal). La forma más sencilla de determinar si un material es puzolánico, según lo indicado en la norma ASTM C-618-08^a, es sumando los porcentajes de sílice, alúmina y hierro; si la sumatoria es igual o mayor al 70% de la composición química del material, este puede ser clasificado como puzolánico (Rangel & Sarmiento, 2010; Xu, et al., 2019).

Por lo anterior, en las tres tablas siguientes se muestra la sumatoria de estos tres minerales para cada ceniza y si corresponden o no como puzolánicos.

3.1.1 Ceniza cáscara de arroz.

Tabla 23

Sumatoria de los minerales: sílice, alúmina y hierro, en las cenizas de cáscara de arroz

Autor	Unidad	Sumatoria Sílice, Alúmina y Hierro	Comportamiento
Castillo, J., 2019		99,18	Puzolánico
Shafabakhsh, G., Divandari, H. & Reza, S., 2018		92,31	Puzolánico
Sargin, et al., 2013	%	92,29	Puzolánico
Akter, R. & Hossain, K., 2017		94,43	Puzolánico
Mohiey, M., Mahdy, H. & Ibrahim, M. 2019		87,99	Puzolánico

Nota: Autores, 2021.

Se observa en la tabla 23 que la sumatoria de los tres minerales es superior al 70% para cada uno de los estudios recopilados, por lo tanto las cenizas de cáscara de arroz presentan comportamiento puzolánico. En la figura 19 se ilustra el gráfico de estos datos.

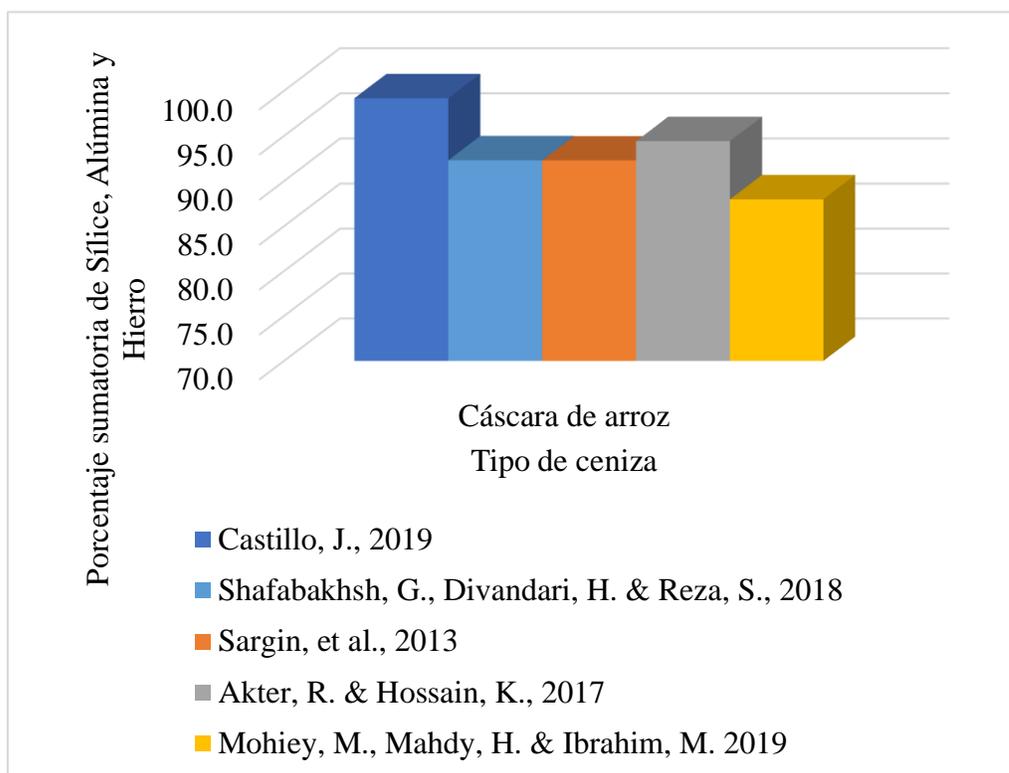


Figura 19. Gráfico de la sumatoria de sílice, alúmina y hierro, en las cenizas de cáscara de arroz. Autores, 2021.

3.1.2 Ceniza caña de maíz.

Tabla 24

Sumatoria de los minerales: sílice, alúmina y hierro, en las cenizas de caña de maíz

Autor	Unidad	Sumatoria Sílice, Alúmina y Hierro	Comportamiento
Lavanya, P., Udaya, M., Anil, N. & Sanyasi, P., 2018		75,49	Puzolánico
Li, et al, 2019		77,10	Puzolánico
Ahmed, A., et al., 2020	%	85,38	Puzolánico
Suwanmaneechot, P., Nochaiya, T., & Julphunthong, P., 2015		71,87	Puzolánico

Nota: Autores, 2021.

Se observa en la tabla 24 que la sumatoria de los tres minerales es superior al 70% para cada uno de los estudios recopilados, por lo tanto las cenizas de caña de maíz presentan comportamiento puzolánico. En el gráfico de la figura 20 se observan estos datos.

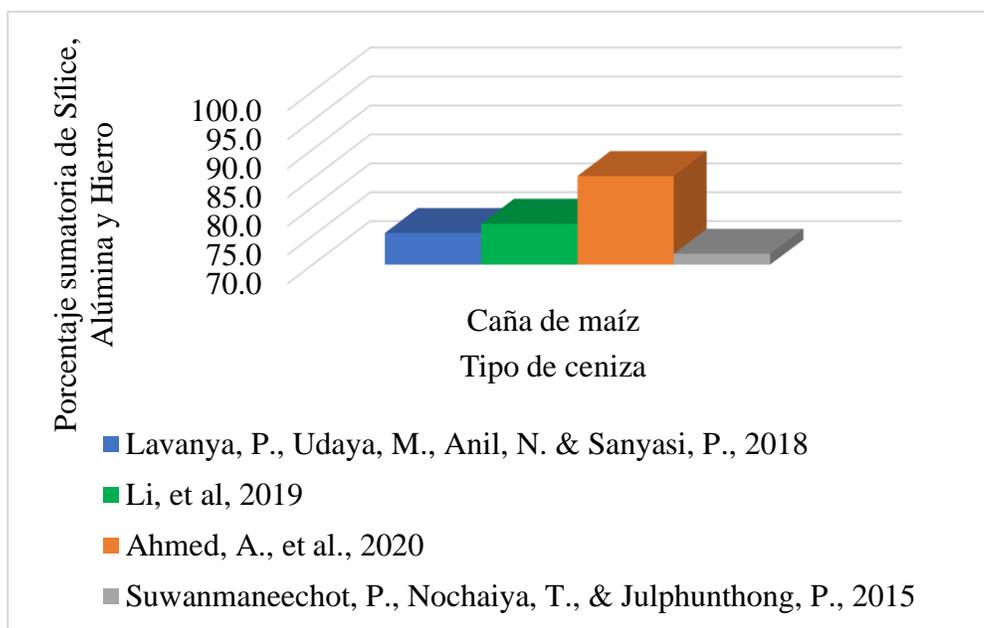


Figura 20. Gráfico de la sumatoria de sílice, alúmina y hierro, en las cenizas de cáscara de arroz. Autores, 2021.

3.1.3 Ceniza carbón.

Tabla 25

Sumatoria de los minerales: sílice, alúmina y hierro, en las cenizas de carbón

Autor	Unidad	Sumatoria Sílice, Alúmina y Hierro	Comportamiento
Modarres, A., Rahmanzadeh, M. & Ayar, P., 2015		86,97	Puzolánico
Mistry, R. & Kumar, T., 2016		79,70	Puzolánico
Peña, J., 2019	%	79,86	Puzolánico
Mirkovic, K., Tosic, N., & Mladenovi, G., 2019		75,19	Puzolánico
Rahmanzadeh, M. & Modarres, A., 2014		70,56	Puzolánico

Nota: Autores, 2021.

Se observa en la tabla 25 que la sumatoria de los tres minerales es superior al 70% para cada uno de los estudios recopilados, por lo tanto las cenizas de carbón presentan comportamiento puzolánico. En el gráfico de la figura 21 se ilustran estos datos.

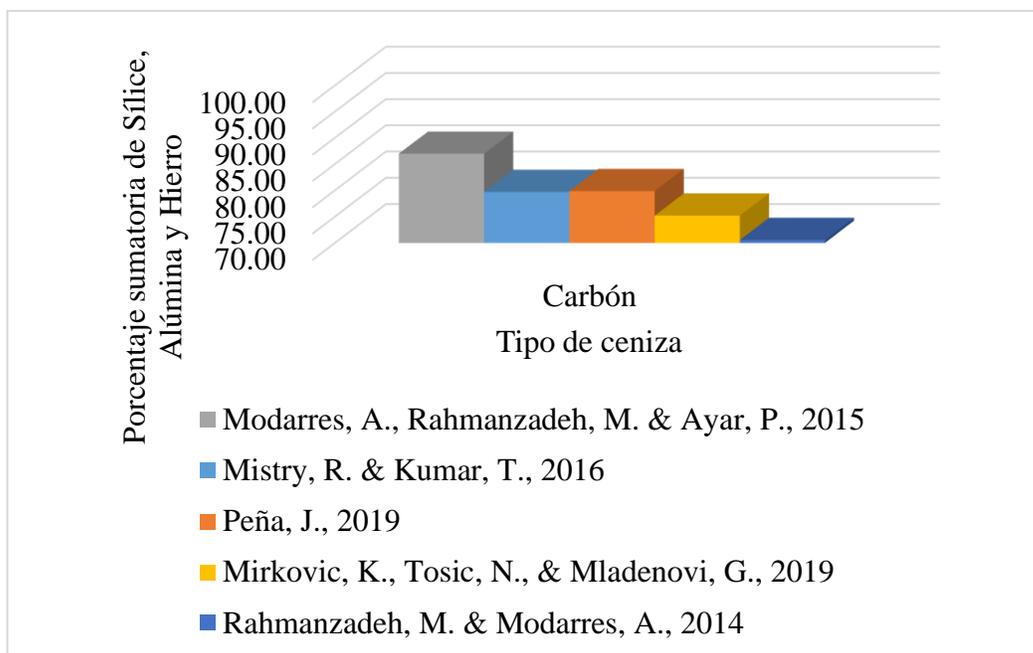


Figura 21. Gráfico de la sumatoria de sílice, alúmina y hierro, en las cenizas de cáscara de arroz. Autores, 2021.

En los tres gráficos anteriores, se puede observar que las cenizas de cáscara de arroz son la que mayor contenido de sílice, alúmina y hierro poseen, con un promedio de 94,6%, por lo cual es la ceniza, químicamente, con mejor comportamiento puzolánico. Le siguen las cenizas de carbón, con un promedio de 80,5% de contenido de estos tres minerales. Por último se encuentran las cenizas de caña de maíz, con un promedio de 76,3%.

3.2 Clasificación de las cenizas

Como se mencionó anteriormente, la ASTM C-618-08^a permite clasificar tres tipos de cenizas: C, F, y N. La primera condición que deben cumplir es tener propiedades puzolánicas, para lo cual deben poseer los minerales que caracterizan a las puzolanas, principalmente sílice,

alúmina y hierro. De acuerdo a esto, las cenizas de caña de maíz, cáscara de arroz y carbón, cumplen esta condición, como se demostró anteriormente (ASTM C-618-08a, 2008; Suriano, 2018).

La clasificación N se aplica para puzolanas naturales, las cuales posteriormente pueden ser o no calcinadas posteriormente, a este grupo corresponden las cenizas de caña de maíz y cáscara de arroz, pues estas cenizas surgen de la calcinación de materias agrícolas, por lo cual son totalmente naturales (ASTM C-618-08a, 2008; Suriano, 2018).

De esta manera quedan solo dos clasificaciones posibles: C y F, y ambas corresponden a la ceniza del carbón. La diferencia entre los dos tipos se encuentra en el contenido de cal que posee la ceniza; si el porcentaje está comprendido entre un 15 a 30% son de clasificación C, y si el porcentaje de cal es inferior al 15% son de clasificación F. En la tabla 26 se resumen los porcentajes de cal contenidos en las cenizas estudiadas (ASTM C-618-08a, 2008; Suriano, 2018).

Tabla 26

Contenido de cal de las cenizas de carbón recopiladas

Autor	Unidad	Mineral Cal
Modarres, A., Rahmanzadeh, M. & Ayar, P., 2015		2,28
Mistry, R. & Kumar, T., 2016		12,30
Peña, J., 2019	%	1,18
Mirkovic, K., Tomic, N., & Mladenovi, G., 2019		2,11
Rahmanzadeh, M. & Modarres, A., 2014		0,05

Nota: Autores, 2021.

De acuerdo a los datos de la tabla 20, las cenizas de carbón estudiadas presentan un contenido de cal inferior al 15%. De esta manera, cumplen con las condiciones para ser clasificadas como tipo F.

Se debe resaltar que las variaciones presentadas en el contenido de cal entre los distintos estudio de las cenizas de carbón, pueden deberse a las diferencias de temperatura entre las centrales termoeléctricas de donde proviene el material estudiado en cada investigación (Adorjányi, 2006).

Capítulo 4. Propiedades mecánicas de la mezcla asfáltica en caliente convencional y modificada

En las investigaciones recopiladas en este trabajo, describen que se realizó la respectiva determinación del contenido óptimo de asfalto a adicionar en la mezcla. Obtenido este valor, se procedía a realizar distintas mezclas con diferentes porcentajes de ceniza, de tal forma que fuera posible determinar la variación producida por la ceniza en la mezcla. En cada una de estas mezclas asfálticas en caliente se determinaron sus propiedades mecánicas, específicamente la estabilidad y el flujo. A continuación se describen los resultados obtenidos en los distintos estudios recopilados.

4.1 Estabilidad y Flujo

La estabilidad del cemento asfáltico indica su capacidad para resistir desplazamientos y deformaciones bajo las cargas del tránsito; mientras que el flujo hace referencia directa a la máxima deformación que se presenta en una muestra de cemento asfáltico al punto de su máxima carga. Ambas propiedades se calculan mediante los procedimientos descritos en la norma ASTM D-1559 *Test method for resistance of plastic flow of bituminous mixtures using Marshall apparatus (Método de ensayo para la resistencia de flujo plástico de mezclas bituminosas utilizando un aparato Marshall)*. En Colombia es aplicable la I.N.V. E-748: Estabilidad y flujo de mezclas asfálticas en caliente empleando el equipo Marshall. En la figura 22 se observa el equipo empleado para realizar este ensayo (INVIAS, 2012; Aduato, 2019).



Figura 22. Equipo empleado para realización del ensayo de estabilidad y flujo. Obtenido en: <http://proetisa.com/proetisa-productos.php?ID=219>

4.1.1 Estabilidad.

A continuación se muestran los resultados recopilados referentes a esta propiedad con cada una de las cenizas estudiadas:

4.1.1.1 Cenizas de cáscara de arroz.

Tabla 27

Estabilidad en las mezclas asfálticas en caliente con adición de ceniza de cáscara de arroz

Autor	Unidad	Porcentaje de ceniza adicionado											
		0	1,25	1,5	2	2,5	3	3,75	4	4,5	5	6	11
Castillo, J., 2019	kN	17,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	19,2
Shafabakhsh, G., Divandari, H. & Reza, S., 2018	kN	11,23	-	12,8	-	-	13,1	-	-	13,3	-	12,5	-
Sargin, et al., 2013	kN	13,02	13,34	-	-	15,3	-	12,72	-	-	9,21	-	-
Hoe, et al., 2014	kN	13,32	13,67	-	-	14	-	14,92	-	-	13,9	-	-
Vijaya, A., Raj, A. & Dash, B., 2018	kN	11,26	-	-	11,3	-	-	-	12	-	-	-	-
Banerjee, J., Ahmed, J. & Rajbongshi, P., 2016		10,65	11,5	-	10,7	-	9,8	-	7,5	-	-	-	-
Putra, R., et al., 2019		10,5	-	-	11,2	-	-	-	11,5	-	-	11,4	-
Mohiey, M., Mahdy, H. & Ibrahim, M. 2019		11,81	-	-	12,1	-	-	-	12,5	-	-	13,1	10,9

Nota: Autores, 2021.

Se observa en la tabla 27 que la adición de ceniza de cáscara de arroz produce un aumento en la estabilidad de la mezcla asfáltica en caliente. En la figura 23 se ilustra gráficamente estos datos.

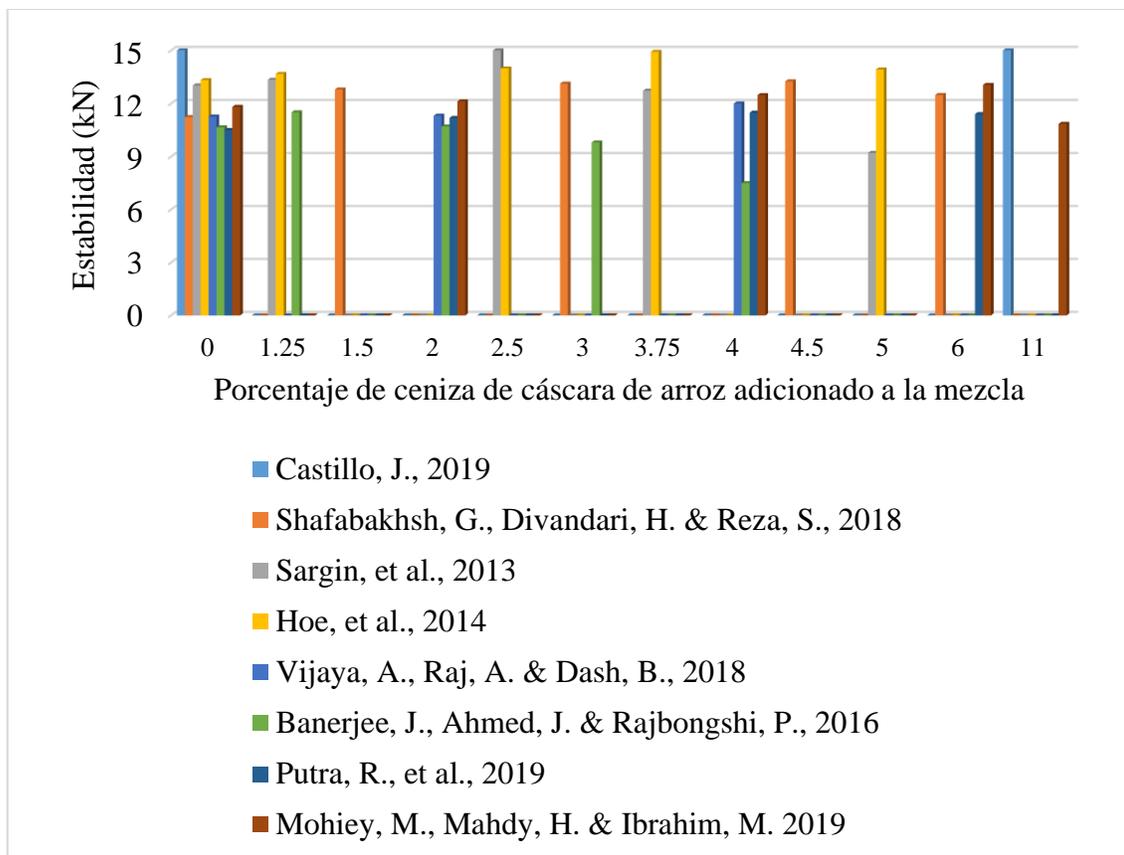


Figura 23. Gráfico de la estabilidad de las mezclas asfálticas en caliente con adición de ceniza de cáscara de arroz. Autores, 2021.

4.1.1.2 Cenizas de caña de maíz.

Tabla 28

Estabilidad en las mezclas asfálticas en caliente con adición de ceniza de caña de maíz

Autor	Unidad	Porcentaje de ceniza adicionado																
		0	0,2	0,3	0,5	0,6	0,9	1	2	3	4	5	6	7	8	9	11	13
Adauto, R., 2019		12,8	12,69	-	12,2	-	-	13,23	13,3	14,5	14,8	-	-	-	-	-	-	-
Lavanya, P., Udaya, M., Anil, N. & Sanyasi, P., 2018	kN	12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12,1	-	14,2	-	14,9	12,5	13,1
Yi, J. & Feng, D., 2019		8,78	-	9,68	-	9,87	11,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ahmed, A., et al., 2020		6,8	-	-	-	-	-	-	7,6	-	7,55	-	7,42	-	6,65	-	-	-

Nota: Autores, 2021.

Se observa en la tabla 28 que la adición de cenizas de caña de maíz, al igual que las de cáscara de arroz, producen un aumento de la estabilidad de las mezclas asfálticas en caliente. En la figura 24 se ilustra el gráfico de estos datos.

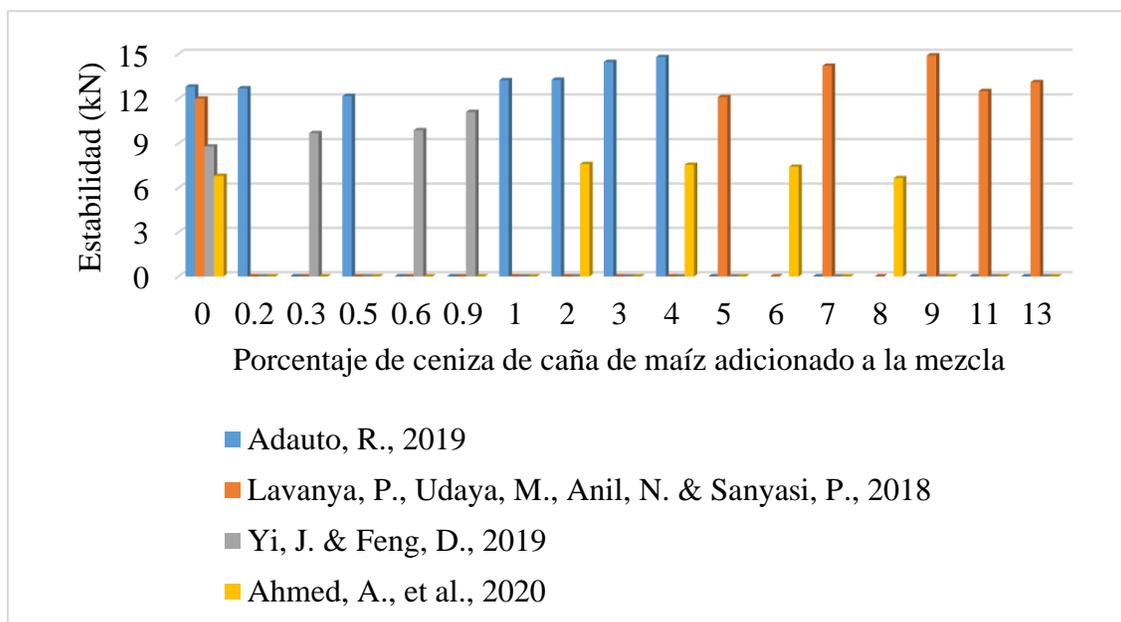


Figura 24. Gráfico de la estabilidad de las mezclas asfálticas en caliente con adición de ceniza de caña de maíz. Autores, 2021.

4.1.1.3 Cenizas de carbón.

Tabla 29

Estabilidad en las mezclas asfálticas en caliente con adición de ceniza de carbón

Autor	Unidad	Porcentaje de ceniza adicionado												
		0	0,25	0,35	0,5	0,75	0,85	1	2	3	4	6	7	8
Modarres, A., Rahmanzadeh, M. & Ayar, P., 2015	kN	8,74	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	12,6	-
Mistry, R. & Kumar, T., 2016		16,08	-	-	-	-	-	-	14	-	15,4	19,5	-	17,5
Peña, J., 2019		14,79	12,01	13,9	15	15,3	14,6	15,21	-	-	-	-	-	-
Mirkovic, K., Tosic, N., & Mladenovi, G., 2019		10,2	-	-	-	-	-	11,3	10	11,8	11,2	-	-	-

Nota: Autores, 2021.

Se observa en los datos de la tabla 29, que las cenizas de carbón producen el mismo efecto en las mezclas asfálticas en caliente que las cenizas de cáscara de arroz y caña de maíz, se aumenta la estabilidad. En la figura 25 se ilustra gráficamente estos datos.

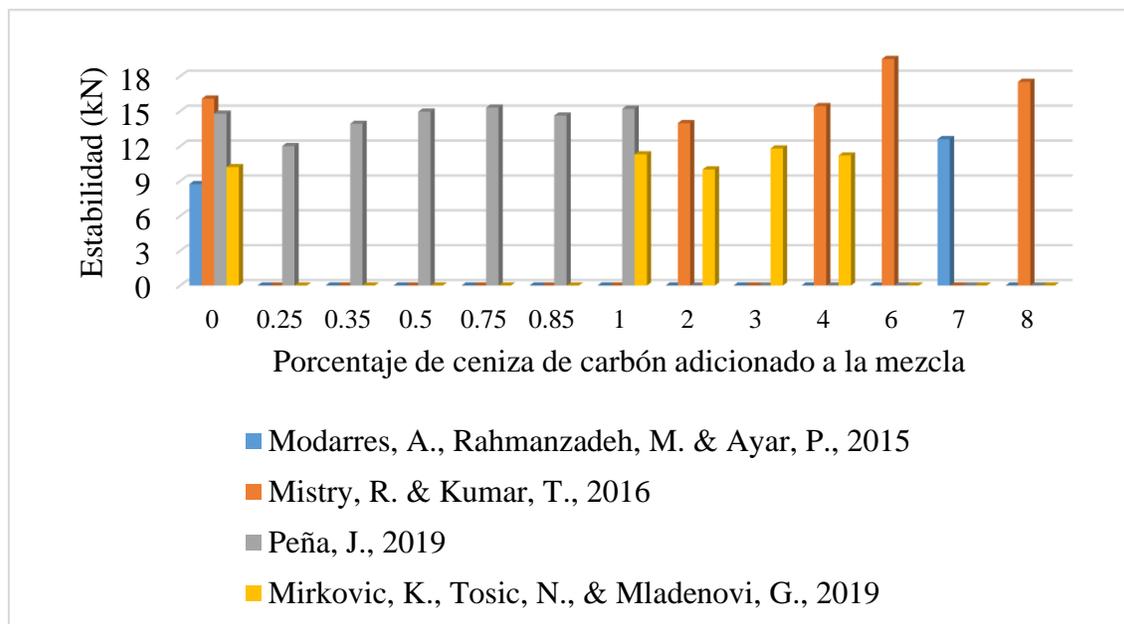


Figura 25. Gráfico de la estabilidad de las mezclas asfálticas en caliente con adición de ceniza de carbón. Autores, 2021.

4.1.1.4 Efecto general de las cenizas sobre la estabilidad.

Como se observó en la información recopilada, la adición de cualquiera de las tres cenizas produce un aumento en el valor de la estabilidad de las mezclas asfálticas en caliente. La ceniza de caña de maíz es la que mayor aumento de la estabilidad produce, con un 9,67% en promedio, seguido de la ceniza de cáscara de arroz con un 5,91%, y por último la ceniza de carbón con un 4,88%. En el gráfico de la figura 26 se muestran los porcentajes de aumento con cada tipo de ceniza.

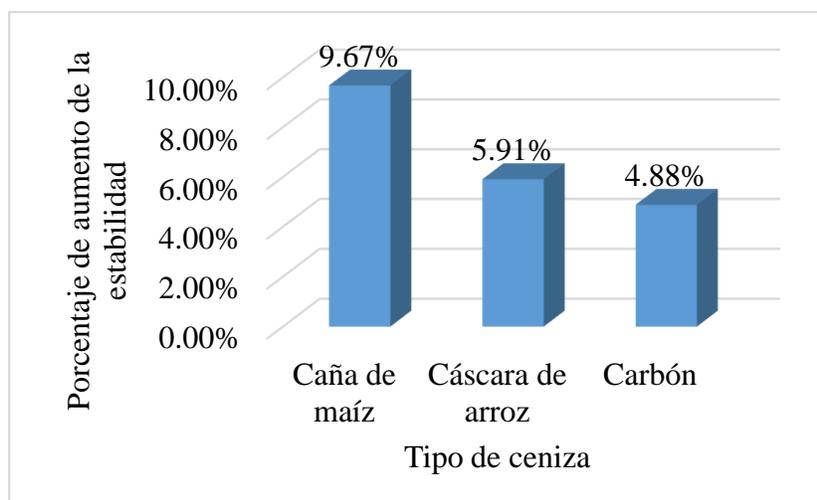


Figura 26. Porcentaje de aumento de la estabilidad con adición de cenizas. Autores, 2021.

4.1.2 Flujo.

A continuación se muestran los resultados recopilados referentes a esta propiedad con cada una de las cenizas estudiadas:

4.1.2.1 Cenizas de cáscara de arroz.

Tabla 30

Flujo en las mezclas asfálticas en caliente con adición de ceniza de cáscara de arroz.

Autor	Unidad	Porcentaje de ceniza adicionado												
		0	1,25	1,5	2	2,5	3	3,75	4	4,5	5	6	8	11
Castillo, J., 2019		6,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7,2
Lizcano, O. & Ramos, D., 2020		6,17	-	-	-	-	6,67	-	-	-	-	7,33	-	-
Shafabakhsh, G., Divandari, H. & Reza, S., 2018		2,4	-	2,45	-	-	2,6	-	-	2,9	-	3	-	-
Sargin, et al., 2013		2,9	2,95	-	-	3,01	-	3,09	-	-	3,17	-	-	-
Hoe, et al., 2014		4,5	4,5	-	-	4,3	-	7,5	-	-	10	-	-	-
Vijaya, A., Raj, A. & Dash, B., 2018	mm	3,2	-	-	3,4	-	-	-	3,5	-	-	-	-	-
Banerjee, J., Ahmed, J. & Rajbongshi, P., 2016		3,8	3,1	-	3,9	-	4,2	-	5,1	-	-	-	-	-
Putra, R., et al., 2019		2,5	-	-	3,5	-	-	-	3,6	-	-	3,8	-	-
Mohiey, M., Mahdy, H. & Ibrahim, M. 2019		2,47	-	-	2,35	-	-	-	2,59	-	-	2,56	2,7	-

Nota: Autores, 2021.

Se observa en los datos de la tabla 30 que la adición de cenizas de cáscara de arroz, produce un aumento en el flujo de la mezcla asfáltica en caliente. En el gráfico de la figura 27 se ilustran estos datos.

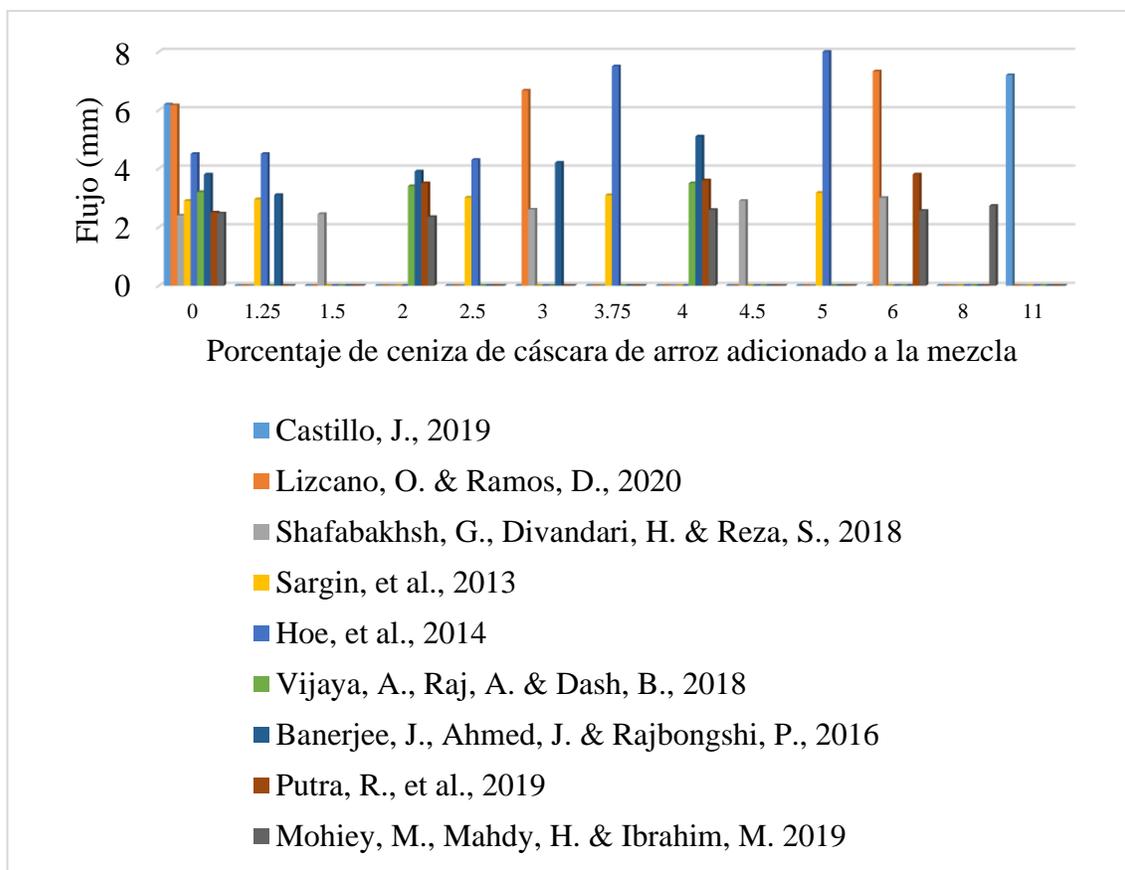


Figura 27. Gráfico del flujo de las mezclas asfálticas en caliente con adición de ceniza de cáscara de arroz. Autores, 2021.

4.1.2.2 Cenizas de caña de maíz.

Tabla 31

Flujo en las mezclas asfálticas en caliente con adición de ceniza de caña de maíz.

Autor	Unidad	Porcentaje de ceniza adicionado																
		0	0,2	0,3	0,5	0,6	0,9	1	2	3	4	5	6	7	8	9	11	13
Adauto, R., 2019		3,1	3,4	-	3,6	-	-	3,4	4,1	4,4	4,7	-	-	-	-	-	-	-
Lavanya, P., Udaya, M., Anil, N. & Sanyasi, P., 2018	mm	3,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,3	-	3	-	3,4	4,3	5,1
Yi, J. & Feng, D., 2019		2,75	-	3,35	-	2,85	3,83	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Ahmed, A., et al., 2020		5,5	-	-	-	-	-	-	4,8	-	3,8	-	3,5	-	3	-	-	-

Nota: Autores, 2021.

En los datos de la tabla 32 se observa que la adición de cenizas de caña de maíz produce, al igual que las de cáscara de arroz, un aumento en el flujo de la mezcla asfáltica en caliente. Estos datos se ilustran gráficamente en la figura 28.

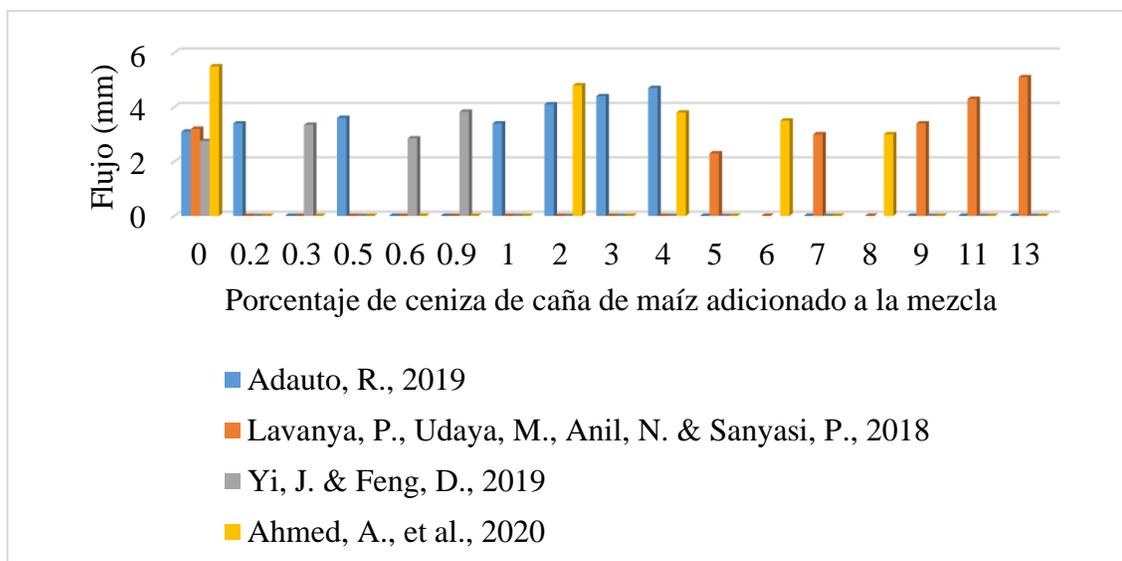


Figura 28. Gráfico del flujo de las mezclas asfálticas en caliente con adición de ceniza de caña de maíz. Autores, 2021.

4.1.2.3 Cenizas de carbón.

Tabla 32

Flujo en las mezclas asfálticas en caliente con adición de ceniza de carbón. Autores, 2021.

Autor	Unidad	Porcentaje de ceniza adicionado												
		0	0,25	0,35	0,5	0,75	0,85	1	2	3	4	6	7	8
Modarres, A., Rahmanzadeh, M. & Ayar, P., 2015		3,13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,5	-
Mistry, R. & Kumar, T., 2016	mm	3,82	-	-	-	-	-	-	3,09	-	3,77	3,35	-	3,79
Peña, J., 2019		4,1	3,8	4,3	4,6	4	3,93	4,07	-	-	-	-	-	-
Mirkovic, K., Tosic, N., & Mladenovi, G., 2019		4,2	-	-	-	-	-	3,3	3,4	3,3	2,5	-	-	-

Nota: Autores, 2021.

Se observa en los datos de la tabla 32 que la adición de cenizas de carbón, al contrario de las otras dos cenizas, representa una disminución en el flujo de las mezclas asfálticas en caliente. En el gráfico de la figura 29 se ilustran estos datos.

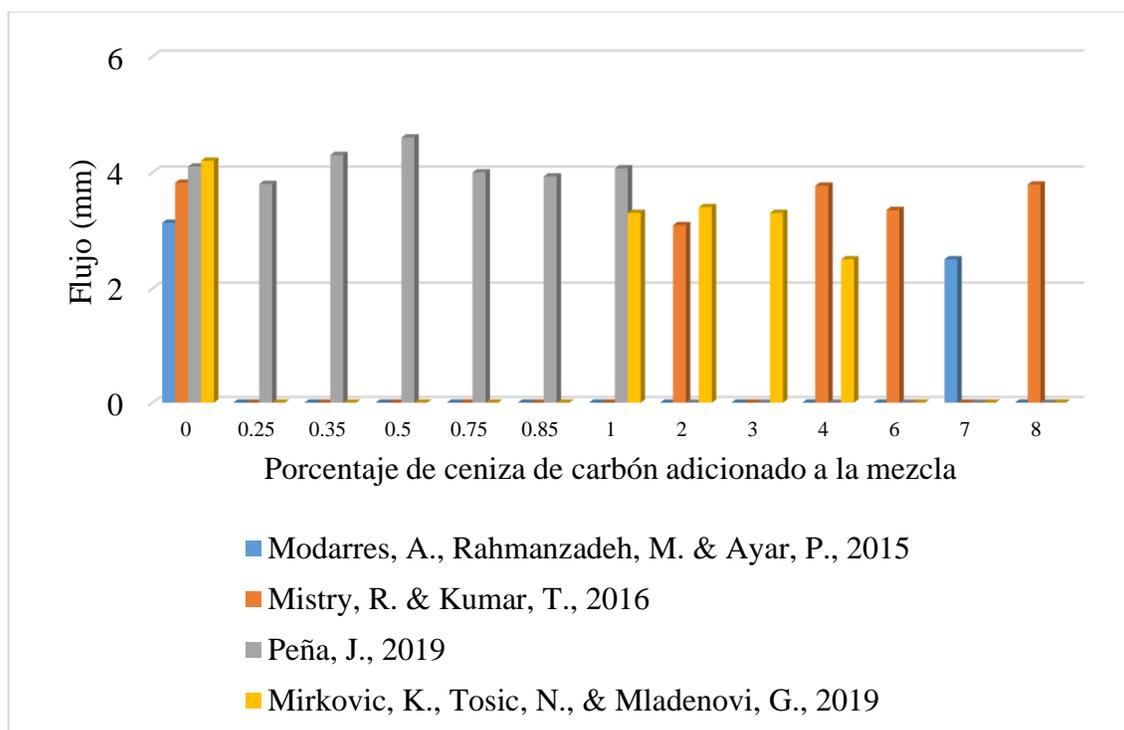


Figura 29. Gráfico del flujo de las mezclas asfálticas en caliente con adición de ceniza de carbón. Autores, 2021.

4.1.2.4 Efecto general de las cenizas sobre el flujo.

Los datos recopilados referentes al flujo de las mezclas asfálticas en caliente con adición de cenizas indican lo siguiente: la adición de cenizas de caña de maíz y de cáscara de arroz producen un aumento del flujo de la mezcla, con un promedio de 20,83% y 18,65%, respectivamente, mientras que la adición de ceniza de carbón produce una disminución de esta propiedad en un promedio de 10,13%.

Capítulo 5. Aspectos ambientales y socioeconómicos asociados a las mezclas asfálticas en caliente en comparación a las mezclas modificadas

El uso de materiales para la fabricación de mezclas asfálticas en caliente se ha asociado como uno de los generados de contaminación ambiental, por tal razón, desde hace varias décadas se han buscado alternativas que permitan mitigar su impacto en el medio ambiente. Una de las soluciones que se ha propuesto, es reemplazar el llenante mineral o filler empleado en este tipo de mezclas (generalmente cemento y cal hidratada), adicionando cenizas, entre ellas las provenientes de la caña de maíz, la cáscara de arroz y el carbón (Lizcano & Ramos, 2020; Akter & Hossain, 2017).

Se ha comprobado que la inclusión de cenizas en las mezclas asfálticas en caliente es una alternativa viable, ya que permite mejorar las propiedades de la mezcla, por lo que su uso ayudaría a mejorar los siguientes aspectos:

5.1 Reducción de residuos sólidos

Se considera como residuo sólido a todo material que después de cumplir su vida útil es desechado. En este sentido, la vida útil está relacionada a un aprovechamiento, si el desecho producido puede transformarse o utilizarse posteriormente, se alarga su vida útil. Con la inclusión de las cenizas provenientes de la caña de maíz, cáscara de arroz y carbón, se emplea un material que bajo otras circunstancias sería totalmente desechado en rellenos sanitarios,

basureros, o como suele suceder de forma continua, depositado en fuentes naturales de agua, bosques, entre otros lugares (Suriano, 2018; Lizcano & Ramos, 2020).

Colombia es uno de los países con peor gestión de este tipo de residuos sólidos, existen tres reportes que han acrecentado las afectaciones producidas por la ceniza de carbón. La primera correspondió a la termoeléctrica Termopaipa en el departamento de Boyacá, donde los residuos de ceniza fueron depositados en los cauces antiguos del río Chichamocha. Por efecto de las lluvias, estas cenizas han ido a parar al actual curso del río, además de ocasionar graves daños al lago Sochagota. El segundo caso es el la termoeléctrica Termoguajira, donde se decidió arrojar las cenizas a una laguna, probando una daño considerable en el ecosistema. Y el tercer caso correspondió con la termoeléctrica Termotasajero, en Norte de Santander, donde las cenizas fueron ubicadas en un cañón por donde corren los vientos que llegan al municipio de San Cayetano, afectando los centros poblados y perjudicando la salud de sus habitantes (Gómez, 2011).

5.2 Reducción de emisiones a la atmósfera

Como se mencionó en el capítulo 3, las cenizas de caña de maíz, cáscara de arroz, y carbón, estas incluidas dentro de las cenizas artificiales, pues se producen de la calcinación o incineración, sin embargo, en el caso de las cenizas de caña de maíz y cáscara de arroz, éstas son producidas para reducir el volumen de desecho de la materia prima original (caña de maíz y cáscara de arroz), con el fin de facilitar los procesos de transporte a los lugares de deposición

final, mientras que las cenizas de carbón se producen en los hornos de plantas termoeléctricas donde se emplea el carbón mineral como combustible para la generación de energía. Las cenizas de carbón son recolectadas o captadas por medio de filtros electrostáticos ubicados en las chimeneas de este tipo de plantas (Troncoso, Camacho, & Reyes, 2006; Lizcano & Ramos, 2020).

Con la ayuda de este tipo de filtros se ha reducido las emisiones de las cenizas de carbón al medio ambiente, las cuales tienen un gran efecto sobre la fauna silvestre y la salud de los seres humanos, sin embargo, estas medidas no se han acompañado de soluciones para el uso de las cenizas recolectadas, por lo cual, están son transportadas por medio de camiones hacia puntos de desecho, sin embargo, durante el transporte se produce un esparcimiento de estas cenizas de tal forma que vienen a representar un grave peligro para la salud por las rutas en las que son transportadas (Suriano, 2018; Kushaha & Jain, 2018).

No existe un cálculo exacto de las cenizas producidas por todas las termoeléctricas en todo el mundo, sin embargo, si se ha calculado que una sola termoeléctrica puede producir millones de toneladas de ceniza por año. Solo en Colombia, se encuentran operando un total de 15 termoeléctricas en la actualidad. Con la inclusión de las cenizas en las mezclas asfálticas en caliente, se estaría brindando un valor comercial a este desecho, de forma semejante al hoy tenido por materiales como el cemento o la cal hidratada, de esta manera se desarrollarían mecanismos para recolectar la mayor cantidad posible de ceniza, y se reduciría drásticamente las emisiones a la atmósfera (Troncoso, Camacho, & Reyes, 2006; Suriano, 2018).

Lo mismo ocurriría con las cenizas de caña de maíz y de cáscara de arroz, pues el uso de éstas generaría un nuevo ingreso para los cultivadores de maíz y arroz, lo cual se reflejaría en una mayor demanda de estos cereales, y promovería un mayor desarrollo para las comunidades rurales. Solo en el caso de Colombia, se producen anualmente más de 2.500.000 toneladas de arroz, de las cuales se generan aproximadamente 700 mil toneladas de cáscara de arroz, lo que representa un mercado de alto potencial (Reyes & Rincón, 2009; Suriano, 2018).

5.3 Reemplazo del llenante mineral

Cómo se mencionó en el capítulo 1, el objetivo principal de este trabajo es determinar si las cenizas de cáscara de arroz, caña de maíz y de carbón, permiten reemplazar los materiales comúnmente usados como llenante mineral en las mezclas asfálticas en caliente: cal y cemento. Por esto, en las siguientes tablas se presenta el contenido de ceniza óptimo de cada estudio, así como el porcentaje de llenante mineral de cada mezcla, el porcentaje que es reemplazado con cada ceniza, y el grado de penetración del asfalto empleado.

5.3.1 Cenizas de cáscara de arroz.

Tabla 33

Reemplazo del llenante mineral en la mezcla asfáltica en caliente con adición de cenizas de cáscara de arroz

Autor	Contenido óptimo de ceniza (%)	Contenido total de llenante mineral de la mezcla asfáltica (%)	Porcentaje de reemplazo del llenante mineral con ceniza (%)	Grado de penetración del asfalto indicado por el autor del estudio
Castillo, J., 2019	4,00	5,0	80,0%	60-70
Shafabakhsh, G., Divandari, H. & Reza, S., 2018	3,00	6,0	50,0%	60-70
Sargin, et al., 2013	2,50	8,0	31,3%	85-100
Hoe, et al., 2014	3,75	7,0	53,6%	70-80
Vijaya, A., Raj, A. & Dash, B., 2018	4,00	7,0	57,1%	70-80

Nota: Autores, 2021.

De la tabla 33 se observa que el porcentaje de reemplazado del llenante mineral de la mezcla asfáltica en caliente, aumenta de acuerdo al grado de penetración del asfalto. Entre menor es el grado de penetración mayor es el porcentaje de reemplazo. En el gráfico de la figura 30 se ilustran estos datos.

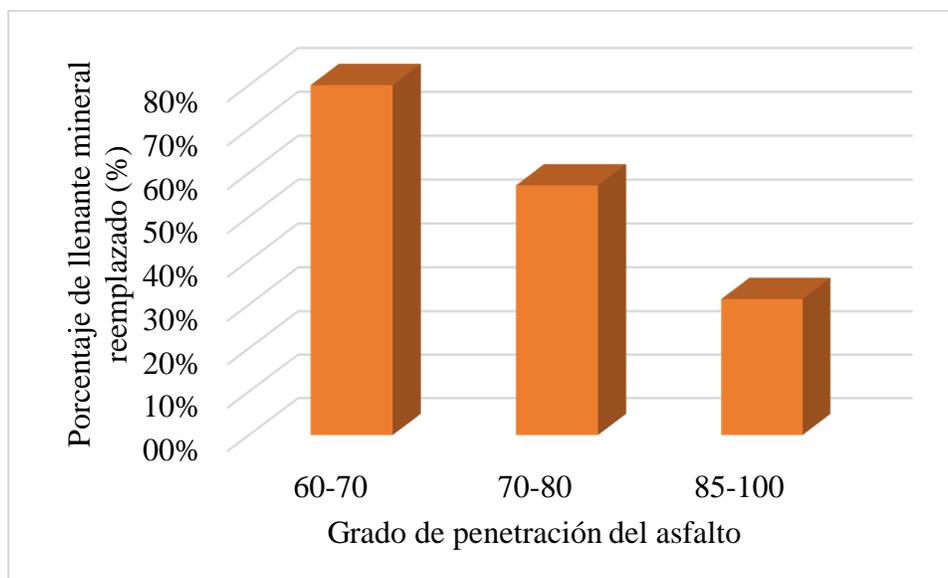


Figura 30. Gráfico del porcentaje de reemplazo del llenante mineral con adición de cenizas de cáscara de arroz en función del grado de penetración del asfalto. Autores, 2021.

5.3.2 Cenizas de caña de maíz.

Tabla 34

Reemplazo del llenante mineral en la mezcla asfáltica en caliente con adición de cenizas de caña de maíz

Autor	Contenido óptimo de ceniza (%)	Contenido total de llenante mineral de la mezcla asfáltica (%)	Porcentaje de reemplazo del llenante mineral con ceniza (%)	Grado de penetración del asfalto indicado por el autor del estudio
Adauto, R., 2019	0,50	5,7	8,8%	85-100
Lavanya, P., Udaya, M., Anil, N. & Sanyasi, P., 2018	8,20	10	82,0%	50-70
Yi, J. & Feng, D., 2019	0,60	10,3	5,8%	80-100

Nota: Autores, 2021.

En la tabla 34 se observa que en las cenizas de caña de maíz, al igual que las de cáscara de arroz, el porcentaje de reemplazo del llenante mineral con ceniza aumenta entre menor sea el grado de penetración del asfalto. En el gráfico de la figura 31 se ilustran estos datos.

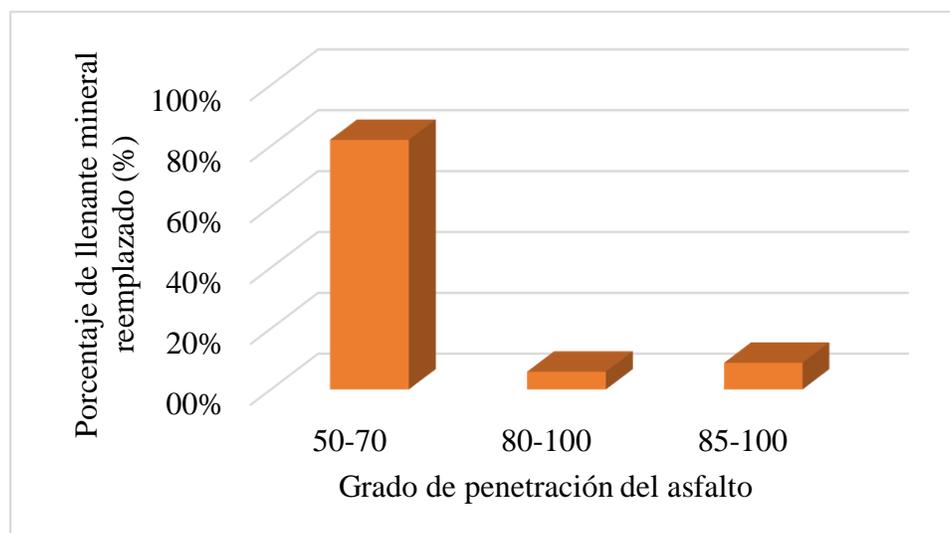


Figura 31. Gráfico del porcentaje de reemplazo del llenante mineral con adición de cenizas de caña de maíz en función del grado de penetración del asfalto. Autores, 2021.

5.3.3 Cenizas de carbón.

Tabla 35

Reemplazo del llenante mineral en la mezcla asfáltica en caliente con adición de cenizas de carbón

Autor	Contenido óptimo de ceniza (%)	Contenido total de llenante mineral de la mezcla asfáltica (%)	Porcentaje de reemplazo del llenante mineral con ceniza (%)	Grado de penetración del asfalto indicado por el autor del estudio
Modarres, A., Rahmanzadeh, M. & Ayar, P., 2015	7,00	7	100,0%	50-70
Peña, J., 2019	0,50	5,8	8,62%	85-100

Nota: Autores, 2021.

Las cenizas de carbón presentan la misma tendencia de las dos cenizas anteriores, como se observa en el gráfico de la figura 32.

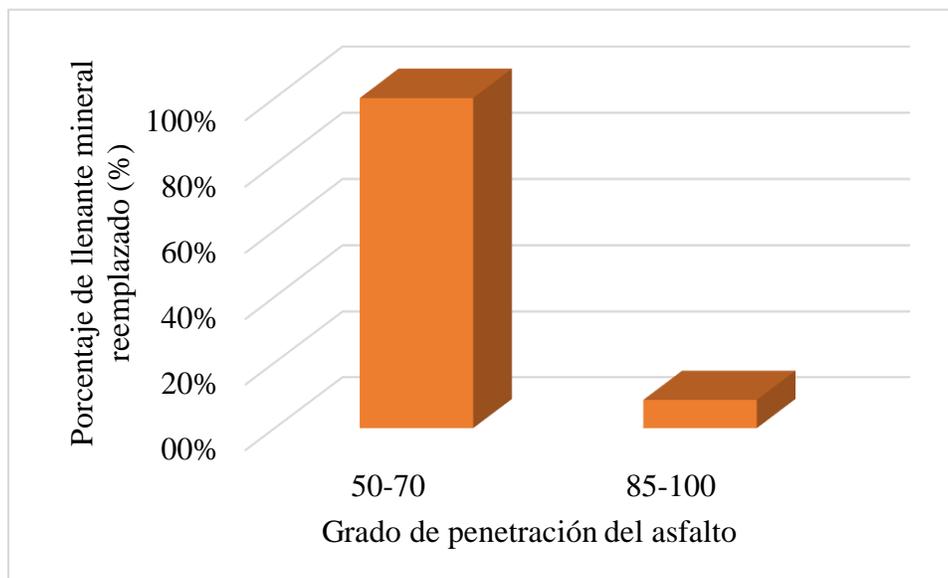


Figura 32. Gráfico del porcentaje de reemplazo del llenante mineral con adición de cenizas de carbón en función del grado de penetración del asfalto. Autores, 2021.

5.4 Efecto del reemplazo del llenante mineral

En el ítem anterior se observó que las cenizas permiten reemplazar el contenido del llenante mineral, por lo menos de manera parcial, y que este porcentaje de reemplazo está relacionado con el grado de penetración del asfalto empleado en la mezcla.

Estos porcentajes de reemplazo varían en cada ceniza. En las de cáscara de arroz el reemplazo puede oscilar entre un 5,8 y un 82%, en la caña de maíz entre un 31,3 y un 80%, y en el carbón entre un 8,62 y un 100%. Es decir, con la ceniza de carbón se pueden alcanzar hasta un

100% de reemplazo del llenante mineral, siempre y cuando se empleó un asfalto con grado de penetración 50-70.

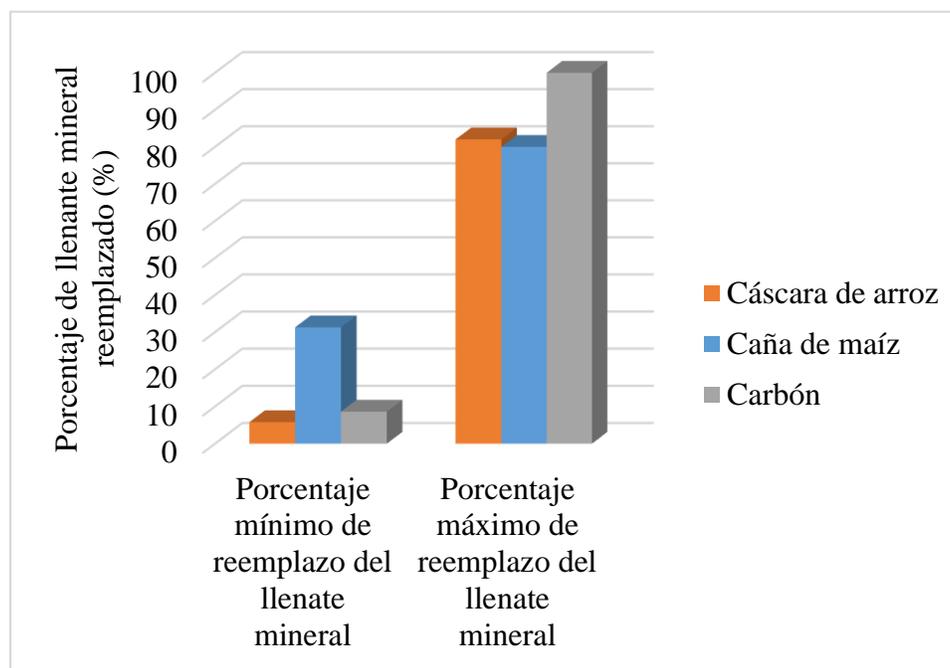


Figura 33. Gráfico del porcentaje de reemplazo mínimo y máximo del llenante mineral con cada tipo de ceniza. Autores, 2021.

El impacto que genera el reemplazo del llenante mineral está determinando por la reducción que representaría en el uso de materiales como el cemento y la cal, los cuales requieren grandes cantidades de energía para su fabricación y son fuente contaminante para el medio ambiente. Con el uso de las cenizas se reduciría este impacto, además se disminuirán los costos finales de las mezclas asfálticas en caliente.

Conclusiones

El contenido de ceniza óptimo en la mezcla es inversamente proporcional al grado de penetración del asfalto empleado en la mezcla asfáltica en caliente, entre mayor sea el grado de penetración, menor es el contenido de ceniza requerido en la mezcla. En cuanto a las propiedades físicas, la densidad tiende a disminuir con la adición de los tres tipos de cenizas, siendo la cáscara de arroz la que mayor disminución produce con un 2,85%, el carbón con 2,18%, y por último la caña de maíz con 1,16%. Respecto al contenido de vacíos de aire, este tiende a aumentar con la adición de cualquiera de las cenizas estudiadas, siendo la ceniza de cáscara de arroz la que mayor aumento produce con un 27,19%, la caña de maíz con un 23%, y por último el carbón con un 21,26% en promedio.

Los ensayos de fluorescencia de rayos X o XRF, aplicados en las cenizas, indican que todas cumplen con los criterios de la ASTM C-618-08^a para ser catalogadas como materiales con comportamiento puzolánico. Las cenizas de cáscara de arroz y caña de maíz son clasificadas de acuerdo a esta norma como tipo N, mientras que las de cenizas de carbón corresponden como tipo F.

Los distintos ensayos recopilados solo se centraron en la obtención de 2 propiedades mecánicas: estabilidad y flujo. En el caso de la estabilidad, esta tiende a aumentar con la adición de los tres tipos de cenizas, siendo las de caña de maíz las que mayor aumento produce en la estabilidad con un 9,67%, la cáscara de arroz con un 5,9%, y las de carbón con un 4,8%. En

cuanto al flujo, este también tiende a aumentar con la adición de las cenizas de caña de maíz y de cáscara de arroz, en un 20,83% y 18,65%, respectivamente, mientras que disminuye con la adición de cenizas de carbón, en promedio un 10,13%. Los resultados muestran que la adición de las cenizas de caña de maíz y de cáscara de arroz tiene un efecto positivo sobre la mezcla, mientras que las cenizas de carbón afectan negativamente el flujo de las mezclas.

Las cenizas de cáscara de arroz, caña de maíz, y de carbón, son generadoras de grandes cantidades de residuos sólidos y de emisiones contaminantes a la atmósfera, por lo que su empleo en las mezclas asfálticas en caliente representa una alternativa viable para mitigar sus impactos ambientales. En cuanto al reemplazo del llenante mineral, con la ceniza de cáscara de arroz se puede reemplazar entre un 5,8 y un 82%, con la ceniza de caña de maíz entre un 31,3 y un 80%, y con las de carbón entre un 8,62 y un 100%. Este porcentaje de reemplazo se correlaciona con el grado de penetración, pues entre menor se este, mayor reemplazo se puede lograr con las cenizas.

De forma general, se concluye que las cenizas de cáscara de arroz, caña de maíz, y de carbón, permiten el reemplazo parcial del llenante mineral. En cuanto al efecto en las propiedades, las cenizas de cáscara de arroz producen la mayor variación en las propiedades físicas, sin embargo, en las propiedades mecánicas las de mayor efecto positivo son las cenizas de caña de maíz. Entre estas 2 cenizas, se concluye que las más adecuadas son las de caña de maíz, pues las propiedades mecánicas son las que permiten determinar el comportamiento de la mezcla asfáltica en caliente.

Referencias

- Adauto, R. (2019). *Comportamiento mecánico de una mezcla asfáltica en caliente con adición de ceniza de caña de maíz*. Trabajo de Maestría, Universidad Ricardo Palma, Lima, Perú.
- Adorjányi, K. (2006). Properties of hot asphalt mixes containing fly ash filler properties of fillers and asphalt mortars. *International Road Conference Budapest*, 23-25.
- Ahmed, A., et al. (2020). Optimum portland cement-guinea corn husk ash blend as filler in hot mix asphalt. *Covenant Journal of Engineering Technology (CJET)*, 4(2), 56-66.
- Akter, R., & Hossain, K. (2017). Influence of rice husk ash and slag as fillers in asphalt concrete mixes. *American Journal of Engineering Research (AJER)*, 6(1), 303-311.
- Ali, N., Chan, J., Simms, S., Bushman, R., & Bergan, T. (1996). Mechanistic evaluation of fly ash asphalt concrete mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 8(1), 19-25.
- ASTM C-618-08a. (2008). *Coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete*. ASTM International.
- Banerjee, J., Ahmed, J., & Rajbongshi, P. (2016). The effective ways of utilization of rice-husk-ash in hot mix asphalt. *Journal of Basic and Applied Engineering Research*, 3(4), 309-314.
- Bautista, W., Díaz, M., & Martínez, S. (2017). Caracterización de las cenizas volantes de una planta termoeléctrica para su posible uso como aditivo en la fabricación de cemento. *Rev.investig.desarro.innov*, 8(1), 135-146.
- Bejarano, J., & Caicedo, C. (2017). *Análisis del comportamiento físico-mecánico de la mezcla asfáltica tipo mdc.19 con fibra natural de caña de azúcar*. Trabajo de pregrado, Universidad Católica de Colombia, Bogotá D.C., Colombia.
- Botella, J., & Zamora, A. (2017). *El meta-análisis: Una metodología para la investigación en educación*. Universidad Nacional de Educación a Distancia, Madrid, España.
- Byung, Y., Dae, P., & Hai, V. (2016). Evaluation of asphalt mixture containing coal ash. *Transportation Research Procedia*, 14, 797-803.
- Caballero, A., & Médico, O. (2013). *Caracterización y posible uso de cenizas resultantes de la combustión del carbón, en la futura Termocentral de lecho fluidizado. Río Turbio (Argentina)*. Universidad Nacional de la Patagonia Austral, Santa Cruz, Argentina.

- Castillo, J. (2019). *Resistencia a la deformación de una mezcla en caliente con adición de un 11% por cenizas de cáscara de arroz*. Trabajo de pregrado, Universidad San Pedro, Chimbote, Perú.
- Chavarro, W., & Molina, C. (2015). *Evaluación de alternativas de pavimentación para vías de bajos volúmenes de tránsito*. Trabajo de especialización, Universidad Católica de Colombia, Bogotá D.C., Colombia.
- Colonna, P., Berloco, N., Ranieri, V., & Shuler, S. (2012). Application of bottom ash for pavement binder course. *Sustainability of Road Infrastructures*, 53, 962-972.
- De la Cruz, E. (2018). *Fluorescencia de rayos X y su aplicación en la determinación de elementos químicos en determinadas muestras*. Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.
- Farooq, U. (2020). Impact of aggregate and fly ash filler types on asphalt and control mix designs. *International Journal of Scientific & Technology Research*, 9(4), 94-98.
- Garnica, P. e. (2005). *Caracterización geomecánica de mezclas asfálticas*. Publicación técnica, Instituto Mexicano del Transporte, Queretaro, México.
- Gómez, J. (2011). *Aprovechamiento de cenizas de carbón mineral producidas en la industria local como material conglomerante en la construcción*. Tesis de pregrado, Universidad de Medellín, Medellín, Colombia.
- Hoe, et al. (2014). Utilisation of rice husk ash in asphaltic concrete pavement. *Advanced Materials Research*, 1030, 961-946.
- Hudales, J. (1994). The use of M.W.I. fly ash in asphalt for road construction. *Environmental Aspects of Construction with waste materials*, 227-232.
- Huwae, D., Parera, L., & Tanijaya, J. (2016). Bagasse-ash as filler in HRS (Hot Rolled Sheet) Mixture. *Advances in Civil, Environmental, and Materials Research*, 28(1), 1-6.
- INVIAS. (2012). *Capítulo 4. Pavimentos asfálticos*. Instituto Nacional de Vías, Bogotá, Colombia.
- Katara, S., Modhiya, C., & Raval, N. (2014). Influence of modify bituminous mix with fly ash. *International Journal of Engineering and Technical Research*, 2(4), 184-186.
- Kushaha, R., & Jain, R. (2018). Review paper on use of rice husk ash as mineral filler in mastic asphalt. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 5(3), 3154-3158.
- Lavanya, P., Udaya, M., Anil, N., & Sanyasi, P. (2018). Experimental study on partial replacement of bitumen using corn cob ash (CCA) in bituminous mix. *International*

- Journal of Technical Innovation in Modern Engineering & Science (IJTIMES)*, 4(12), 179-191.
- Li, et al. (2019). Effect of cornstalk ash on the microstructure of cement-based material under sulfate attack. *AEECE*, 1-7.
- Lizcano, O., & Ramos, D. (2020). *Estudio del comportamiento físico-mecánico de mezclas asfálticas modificadas con llenante mineral de ceniza de la cascarilla resultante de la molienda del arroz*. Tesis de pregrado, Universidad Católica de Colombia, Bogotá D.C., Colombia.
- Meneses, J., & Páez, D. (2017). *Mezcla asfáltica permeable como parte de la estructura de pavimento a partir del uso y modificación de una mezcla drenante aplicado a vías urbanas*. Tesis de pregrado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia.
- Mirkovic, K., Tomic, N., & Mladenovi, G. (2019). *Effect of different types of fly ash on properties of asphalt mixtures*. doi:<https://doi.org/10.1155/2019/8107264>
- Mistry, R., & Kumar, T. (2016). Effect of using fly ash alternative filler in hot mix asphalt. *Perspectives in Science*, 8, 307-309.
- Modarres, A., & Rahmanzadeh, M. (2014). Application of coal waste powder as filler in hot mix asphalt. *Construction and Building Materials*, 66, 476-483.
- Mohiey, M., Mahdy, H., & Ibrahim, M. (2020). Effect of rice husk ash on the performance of hot asphalt mixes. *Mansoura Engineering Journal*, 45(2), 8-19.
- Orozco, G., & Murillo, J. (2011). *Evaluación del comportamiento de una mezcla densa en caliente modificada con ceniza proveniente de locaciones petroleras*. Trabajo de pregrado, Universidad Pontificia Bolivariana, Bucaramanga, Colombia.
- Osinubi, K., & Edeh, J. (2011). Reconstituted Coal Ash Stabilization of Reclaimed Asphalt Pavement. *Geo-Frontiers*, 1172-1181.
- Parra, M., & Gallo, J. (2018). *Evaluación del comportamiento del asfalto modificado con cenizas de cascarilla de arroz*. Trabajo de pregrado, Universidad de Ibagué, Ibagué, Colombia.
- Peña, J. (2019). *Desempeño mecánico de la mezcla asfáltica en caliente incorporando cenizas volantes provenientes de la termoeléctrica de Ilo*. Trabajo de Maestría, Universidad Ricardo Palma, Lima, Perú.
- Putra, R., et al. (2017). Marshall stability properties of asphalt mixtures incorporating black rice husk ash. *Materials Today: Proceedings*, 5, 22056-22062.
- Quoc, D., Van, N., Hoang, P., & Son, V. (2015). Thermogravimetric study on rice, corn and sugar cane crop residue. *Journal of Sustainable Energy & Environment*, 6, 87-91.

- Ramme, B., Covi, A., Faheem, A., & Sobolev, K. (2016). Fly Ash-An Important Ingredient for use in Hot-Mix ASHphalt Concrete. *Fourth International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies*.
- Rangel, L., & Sarmiento, M. (2010). *Influencia de las características granulométricas y mineralógicas del filler sobre la rigidez de las mezclas asfálticas*. Trabajo de pregrado, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.
- Rengarasu, T., et al. (2020). Suitability of coal bottom ash and carbonized rice husk in hot mix asphalt. *Asian Transport Studies*, 6, 1-6.
- Reyes, O., & Rincón, J. (2009). Influencia de las características del relleno mineral en la resistencia de una mezcla asfáltica. *Revista EIA*.
- Rosales, J. (2019). *Resistencia a la deformación de una mezcla asfáltica en caliente con adición de un 10% por cenizas de carbón mineral*. Trabajo de pregrado, Universidad San Pedro, Chimbote, Perú.
- Sánchez, S. (2014). *Evaluación de mezclas asfálticas con adición de ceniza como porcentaje del ligante y del llenante*. Trabajo de pregrado, Universidad Pontificia Bolivariana, Bucaramanga, Colombia.
- Sargin, et al. (2013). Evaluation of rice husk ash as filler in hot mix asphalt concrete. *Construction and Building Materials*, 48, 390-397.
- Shafabakhsh, G., & Ahmadi, S. (2016). Evaluation of coal waste ash and rice husk ash on properties of pervious concrete pavement. *International Journal of Engineering*, 29(2), 192-201.
- Shafabakhsh., G., Divandari, H., & Reza, S. (2018). Evaluation of optimum content of rice husk ash to improve the hot asphalt concrete performance. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(20), 338-346.
- Suriano, I. (2018). *Mezcla asfáltica en caliente por método marshall, adicionando cenizas volantes*. Universidad de San Carlos de Guatemala, Ciudad de Guatemala.
- Suwanmaneechot, P., Nochaiya, T., & Juphuthong, P. (2015). Improvement, characterization and use of waste corn cob ash in cement-based materials. *Materials Science and Engineering*, 103, 1-12.
- Tello, P. (2018). *Efectos que produce el jugo de caña en la durabilidad y propiedades de una carpeta asfáltica*. Trabajo de pregrado, Universidad de San Carlos de Guatemala, Ciudad de Guatemala.
- Troncoso, J., Camacho, J., & Reyes, O. (2006). *Comportamiento mecánico y dinámico de una mezcla asfáltica con adición de cenizas volantes*.

- Vasudevan, G. (2017). Effect on coal Bottom Ash in Hot Mix Asphalt (HMA) as Binder Course. *Proceeding of the International Multiconference of Engineers and Computer Scientists*, 2.
- Vijaya, A., Raj, A., & Dash, B. (2018). An experimental investigation of bitumen mix using rice straw ash as filler. *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*, 9(10), 1741-1748.
- Wei, S., & You, Z. (2008). The dynamic modulus of asphalt mixture with bottom ash aggregates. *GeoCongress*, 1008-1015.
- Xu, et al. (2019). The effect of retreated coal wastes as filler on the performance of asphalt mastics and mixtures. *Construction and Building Materials*, 9-17.
- Yi, J., & Feng, D. (2019). Preparation method of corn stalk fiber material and its performance investigation in asphalt concrete. *Sustainability*, 11, 1-24.
- Zagvozda, M., Dimter, S., Rukavina, T., & Netinger, I. (2017). Possibilities of bioash application in road building. *Gradevinar*, 5, 393-402.