



# JORNADAS RECICLAJE

B O G O T Á 2 0 2 5



**La Utilización del Polvo NFU en mezclas asfálticas  
bajo la mirada del análisis del ciclo de vida**

Gilberto Martinez-Arguelles., I.C, M.Sc.,  
Ph.D  
Profesor Asociado  
[garguelles@uninorte.edu.co](mailto:garguelles@uninorte.edu.co)

INTERNATIONAL  
STANDARD

ISO  
14040

Second edition  
2006-07-01

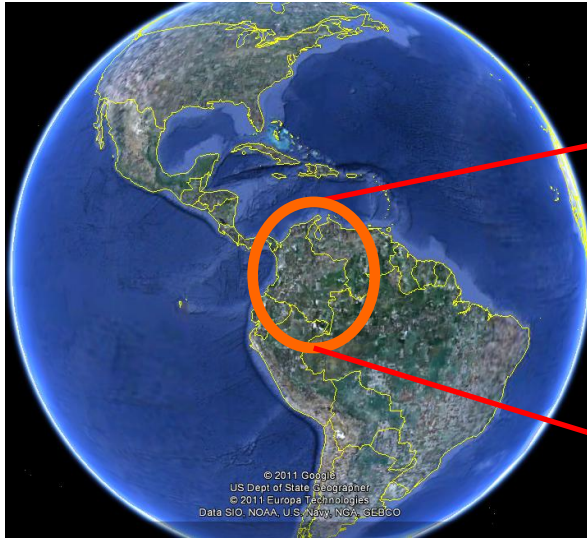
Environmental management — Life cycle  
assessment — Principles and framework

Management environnemental — Analyse du cycle de vie — Principes  
et cadre





- Barranquilla - Location



JORNADAS RECICLAJE  
BOGOTÁ 2025



# CONTENIDO

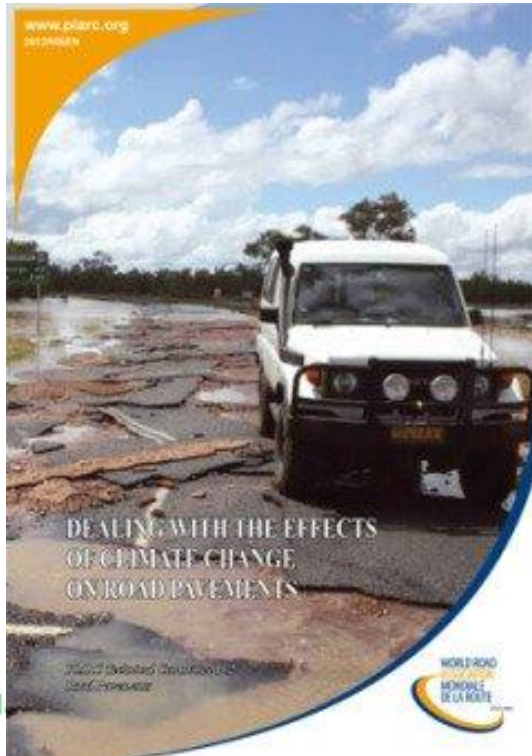
- Introducción
  - Problemática ambiental y oportunidad en infraestructura vial
  - El concepto de huella de carbono
  - Economía Circular
- Análisis del Ciclo de Vida (ACV)
- Ciclo de vida de un Pavimento
- Mezclas asfálticos con NFU y su ACV
- Resultados del ACV Aplicado a Mezclas con NFU
  - Ejemplos nacionales e internacionales
- Conclusiones

# INTRODUCCIÓN

## Problemática Global y cambio climático

**Cuáles serían los impactos probables del cambio climático en centros urbanos?**

✓ Colombia



This is a screenshot of the World Road Association (Mondiale de la Route) website. The header includes the organization's name in English and French, along with navigation links for 'ABOUT US', 'MEMBERSHIP / APPLICATION', and 'NATIONAL COMMITTEES'. A search bar is present with the text 'EXCHANGE KNOWLEDGE AND TECHNIQUES ON ROADS AND ROAD TRANSPORTATION'. Below the search bar are tabs for 'KNOWLEDGE BASE', 'VIRTUAL LIBRARY', 'TERMINOLOGY', 'LINKS', and 'EVENTS'. The main content area is titled 'D.2 Pavements' and includes sub-sections: 'IN BRIEF', 'MEMBERS', 'MINUTES OF MEETINGS', and 'ARCHIVES DZA'. Under 'Issues', there is a list of topics: 'D.2.1 Green paving solutions and sustainable pavement materials', 'D.2.2 Low cost pavements systems', and 'D.2.3 Non-destructive pavement monitoring and testing techniques'. The 'Chair and Secretariat' section lists: 'Chair: Seung-Hwan HAN (Republic of Korea)', 'English-speaking Secretary: Johan MAECK (Belgium)', 'French-speaking Secretary: Christine DENEUVILLERS (France)', and 'Spanish-speaking Secretary: Diego CALO (Argentina)'.



# INTRODUCCIÓN

## Problemática Global y cambio climático

**Cuáles serían los impactos probables del cambio climático en centros urbanos?**



<https://www.eltiempo.com/noticias/>

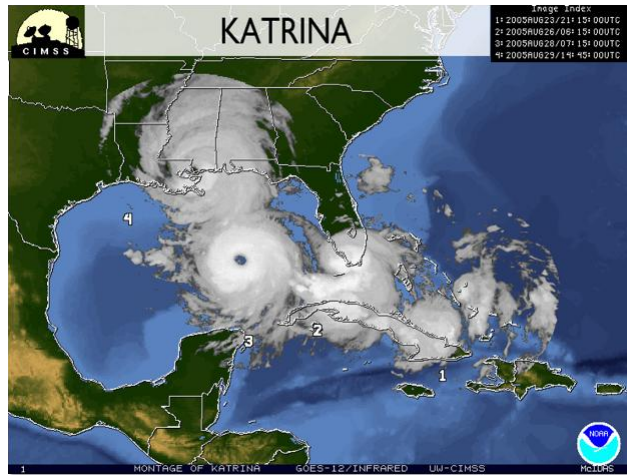
<https://www.elheraldo.co/>



# INTRODUCCIÓN

## Problemática Global y cambio climático

**Cuáles serían los impactos probables del cambio climático en centros urbanos?**



[cimss.ssec.wisc.edu](http://cimss.ssec.wisc.edu)

Un espacio para la tecnología, el conocimiento y el futuro del reciclaje de neumáticos en Latinoamérica

# INTRODUCCIÓN

## Que se entiende por huella de Carbono de una actividad?

La Huella de Carbono es la medida del impacto de todos los gases de efecto invernadero producidos por nuestras actividades (individuales, colectivas, eventuales y de los productos) en el medio ambiente". Se mide en toneladas o kilos de dióxido de carbono equivalente de gases de efecto invernadero.\*





# INTRODUCCIÓN

## Economía Circular y los ODS

La economía circular se define como un sistema de aprovechamiento basado en la reducción, reutilización y el reciclaje de los elementos.

Se trata de un concepto económico, interrelacionado con la sostenibilidad, fundado bajo el principio de “cerrar el ciclo de vida” de todos los productos.



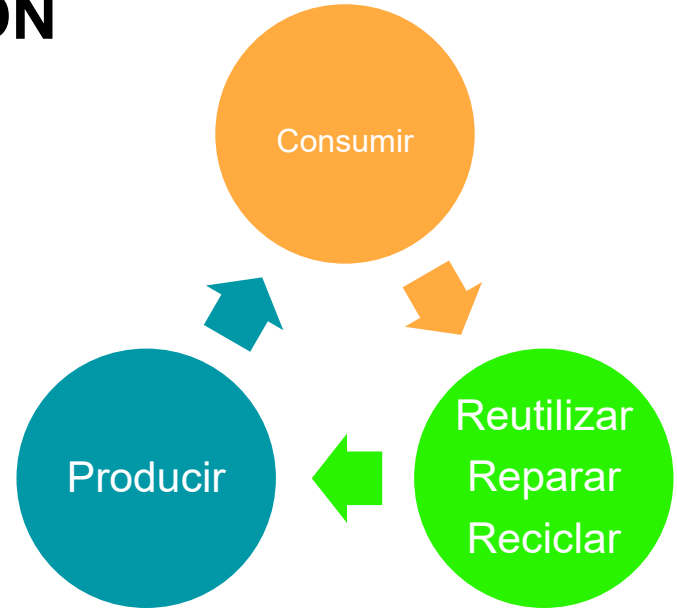


# INTRODUCCIÓN

## Economía Circular y los ODS



**Economía lineal**



**Economía circular**

# INTRODUCCIÓN

## Economía Circular y los ODS



Un espacio para la tecnología, el conocimiento y el futuro del reciclaje de neumáticos en Latinoamérica

# INTRODUCCIÓN

## Economía Circular y los ODS



Construir  
infraestructuras  
resilientes, promover la  
industrialización  
inclusiva y sostenible y  
fomentar la innovación.



# INTRODUCCIÓN

## Economía Circular y los ODS

### Infraestructura vial y sostenibilidad



Road facilities and equipment, including the network, parking spaces, stopping places, draining system, bridges and footpaths.

Un espacio para la tecnología, el conocimiento y el futuro del reciclaje de neumáticos en Latinoamérica



JORNADAS RECICLAJE  
BOGOTÁ 2025



# INTRODUCCIÓN

La MEDICIÓN de la Sostenibilidad es un área en evolución:

✓ Se reconocen 4 métodos o enfoques:

- ☐ Evaluación del desempeño
- ☐ Life Cycle Cost Analysis
- ☐ Life cycle assessment - LCA
- ☐ Sistemas de calificación de la Sost..



Muchos aspectos requieren mayor estudio: límites, métricas para medir equidad/impacto social asociados a sistemas de pavimentos/infraestructura (FHWA).



JORNADAS RECICLAJE  
BOGOTÁ 2025

# ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA - LCA

## ❑ Life cycle assessment - LCA

- ✓ El ACV trata los aspectos ambientales e impactos ambientales potenciales, a lo largo de todo el ciclo de vida de un producto desde la adquisición de la materia prima hasta, pasando por la producción, uso, tratamiento final, hasta su disposición final (de la cuna hasta la tumba)

INTERNATIONAL  
STANDARD

ISO  
14040

Second edition  
2006-07-01

---

Environmental management — Life cycle  
assessment — Principles and framework

Management environnemental — Analyse du cycle de vie — Principes  
et cadre



# ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA - LCA

## □ Life cycle assessment - LCA

✓ Fases de un estudio ACV:

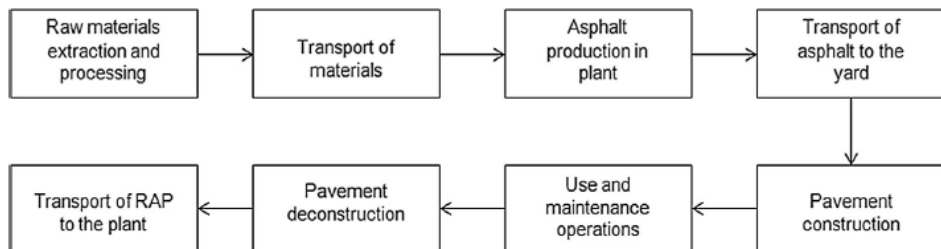
1. Definición del objetivo y alcance
2. Fases de análisis de Inventario
3. Fase de evaluación del Impacto Ambiental
4. Fase de Interpretación



Ciclo de vida de la construcción y mantenimiento de carreteras

# CICLO DE VIDA DE UN PAVIMENTO

Fases del ciclo de vida del pavimento (UCPRC, 2010)







# PAVIMENTOS ASFÁLTICOS CON NFU Y SU LCA

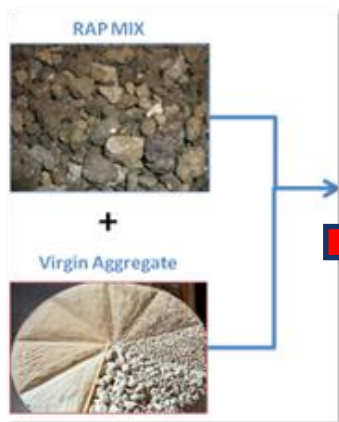
## Antecedente de las Mezclas Asfálticas con NFU.

- ❑ El caucho reciclado de llantas (**NFU**), proveniente de llantas en desuso, se ha utilizado en mezclas asfálticas por la industria de pavimentación desde la década de 1960.
- ❑ El **NFU** se ha utilizado como modificador del ligante asfáltico y como ligante en mezclas asfálticas de tipo discontinuo (gap-graded), abierto (open-graded) y densas, así como en tratamientos superficiales.
- ❑ Asfalto Caucho se obtiene generalmente mediante el proceso húmedo (entre otros procesos “seco”, “terminal”), que consiste en la mezcla del ligante asfáltico con el caucho.
- ❑ Estudios han establecido que cuatro pulgadas de asfalto convencional pueden sustituirse fácilmente por dos pulgadas de asfalto con caucho, obteniendo características de fatiga similares. ARGG (Caltrans 2006).

# PAVIMENTOS ASFÁLTICOS CON NFU Y SU LCA

Temp producción - 150°C

Temp producción > 160°C



95% agregados

5% Cem Asfáltico

**HMA – MDC (Convencional)**

**ARM – MCCH (modificada con caucho)**



# PAVIMENTOS ASFÁLTICOS CON NFU Y SU LCA

## ✓ Beneficios ambientales de las mezclas modificadas con NFU (GCR)

### ☐ Reducción de residuos:

Ofrece un uso sostenible para millones de llantas desechadas cada año, evitando que terminen en vertederos.

### ☐ Conservación de recursos:

El uso de caucho reciclado disminuye la demanda de materiales vírgenes en nuevas mezclas asfálticas.

### ☐ Ahorro de energía y reducción de emisiones:

La incorporación de caucho reciclado puede reducir la energía necesaria para producir asfalto, lo que a su vez disminuye las emisiones de gases de efecto invernadero y otros contaminantes.

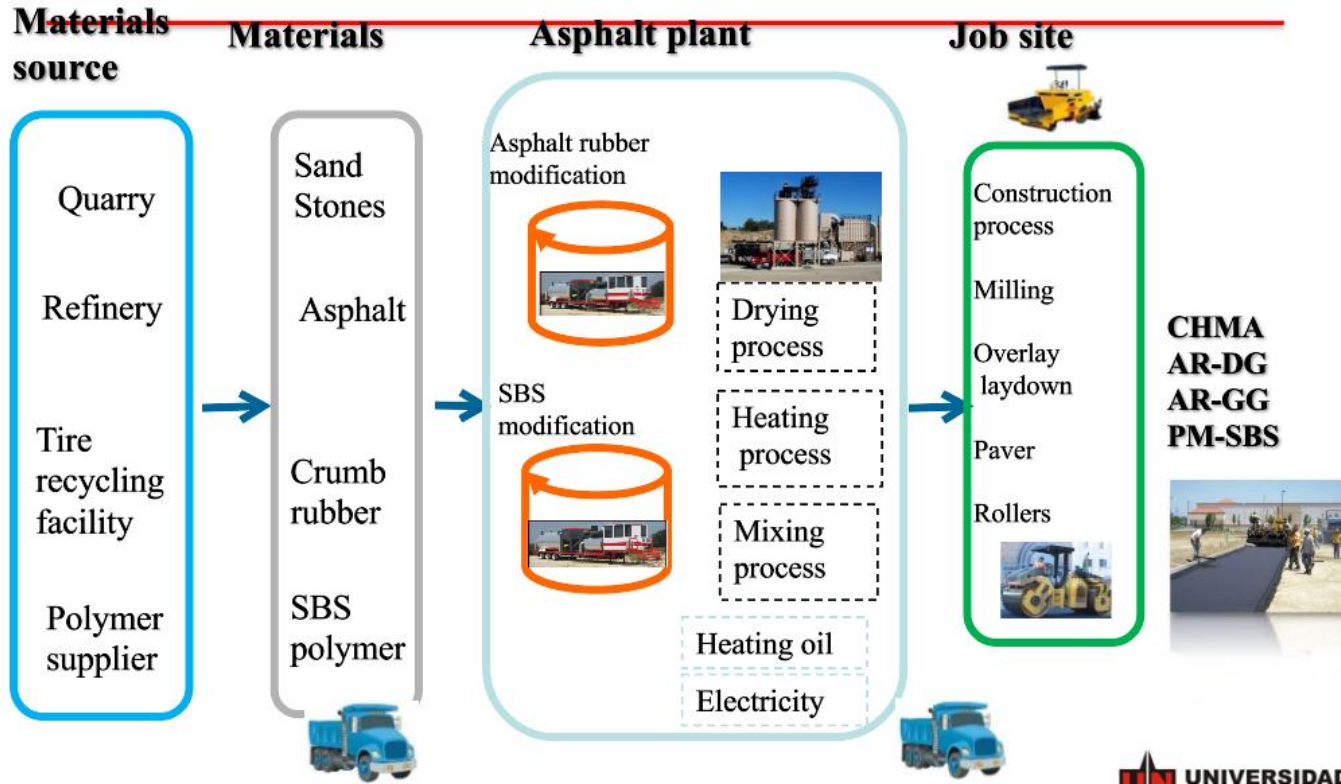
### ☐ Mayor vida útil:

El asfalto con caucho genera un pavimento más duradero, lo que prolonga su vida de servicio y reduce la frecuencia de reparaciones y repavimentaciones.

### ☐ Recuperación de acero

# PAVIMENTOS ASFÁLTICOS CON NFU Y SU LCA

- ✓ Consideraciones en la producción de las mezclas modificadas con NFU (GCR)



JORNADAS RECICLAJE  
BOGOTÁ 2025

Martinez et al 2013



# PAVIMENTOS ASFÁLTICOS con NFU

## marco normativo en Colombia

- ✓ **Consideraciones en la producción de las mezclas modificadas con NFU (GCR)**

Capítulo 4 – PAVIMENTOS ASFÁLTICOS Art. 413

Suministro de cemento asfáltico modificado  
con grano de caucho reciclado

Artículo 413 – 22

Capítulo 4 – PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

Art. 467

Mezclas asfálticas en caliente con cemento asfáltico modificado  
con Grano de Caucho Reciclado (GCR)

Artículo 467 - 22



Un espacio para la tecnología, el conocimiento y el futuro del reciclaje de neumáticos

<https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/documentos-tecnicos/14480-especificaciones-generales-de-construccion-de-carreteras-2022-1>

# PAVIMENTOS ASFÁLTICOS CON NFU Y SU LCA

## Comportamiento Mecánico

Primer Tramo de prueba a escala real con  
GCR en Colombia – Los Alamos

IDU – LOS ANDES 2005

### Bogotá Test Track: performance analysis (2004-2008)

ESAL's:  $4 \times 10^6$

- ✓ Pavement Structure: 70 mm surface course  
150 mm unbound granular base (30% RAP)

It was evaluated:

- ✓ Conventional hot-mix asphalt (C-HMA)
- ✓ Polymer-modified hot-mix with SBS (PM-SBS)
- ✓ Crumb rubber mix – wet process (AR-DG)

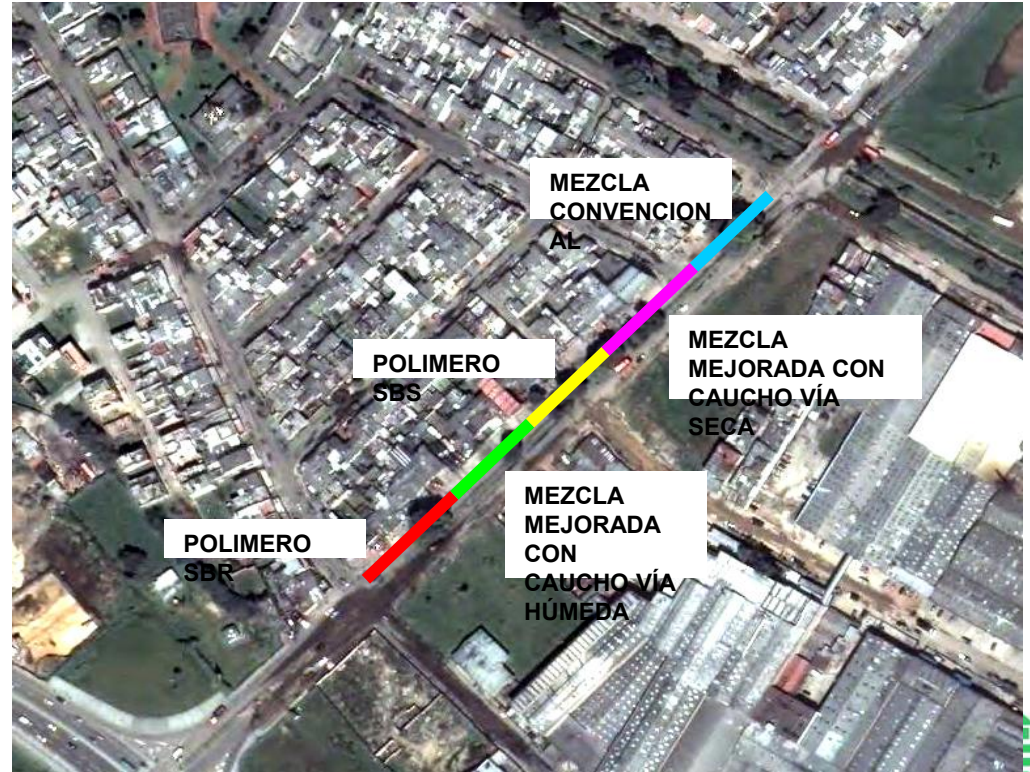


# PAVIMENTOS ASFÁLTICOS CON NFU Y SU LCA

## Comportamiento Mecánico

Primer Tramo de prueba a escala real con GCR en Colombia – Los Alamos

IDU – LOS ANDES 2005

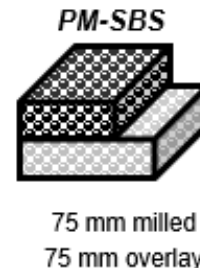
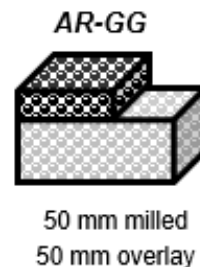
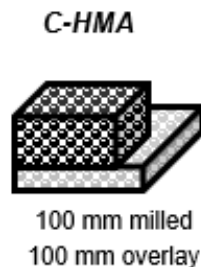


# PAVIMENTOS ASFÁLTICOS CON NFU Y SU LCA

## Comportamiento Mecánico

Primer Tramo de prueba a escala real con  
GCR en Colombia – Los Alamos

IDU – LOS ANDES 2005

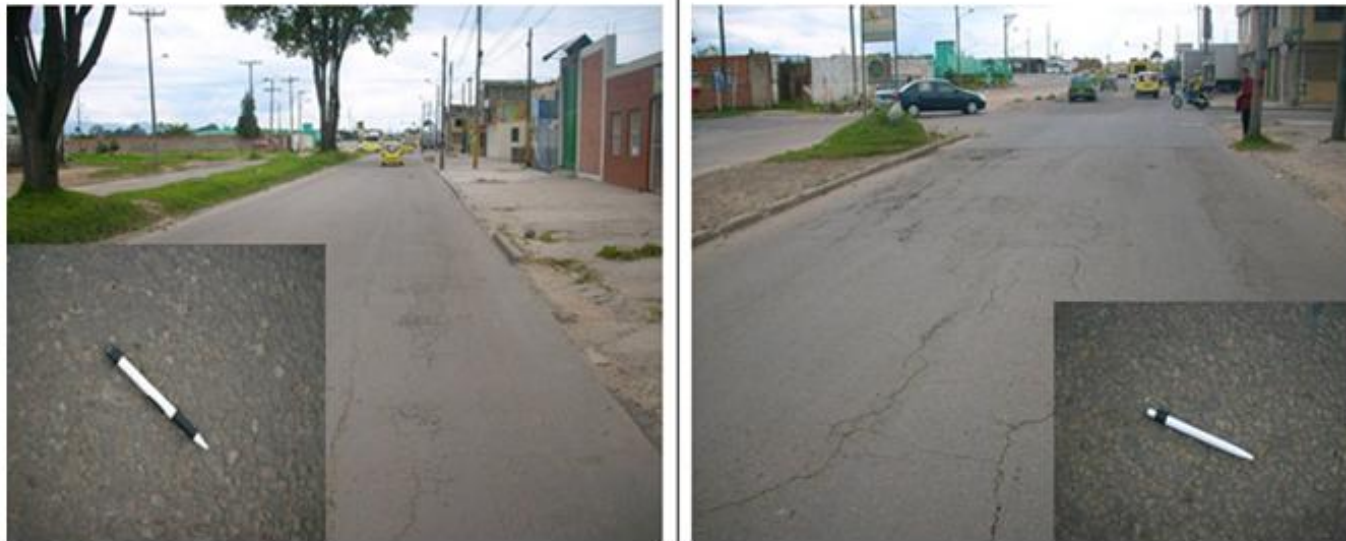


**Job mix  
formula**

HMA type	Aggregates (%)	asphalt binder(%)	Modifier (% w binder) (CR, SBS)
CHMA	94.5	5.5	-
AR-DG	93.3	6.7	18
AR-GG	92	8	25
PM-SBS	93.7	6.3	5



# PAVIMENTOS ASFÁLTICOS CON NFU Y SU LCA



Estado superficial después de cuatro años, sección con GCR (VH) a izquierda y tramo Polímero SBR a derecha.

Martínez-Argüelles, G., Crispino, M., Giustozzi, F., & Flintsch, G. W. (2013). *Environmental analysis of asphalt pavement maintenance using modified binders in developing countries: case study in Bogotá, Colombia* (No. 13-3475).

Un espacio para la tecnología, el conocimiento y el futuro del reciclaje de neumáticos en Latinoamérica

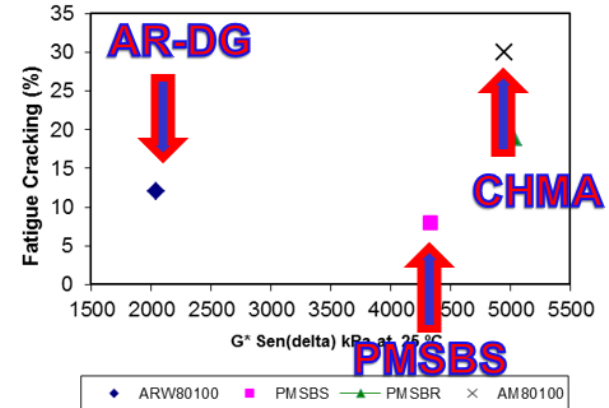
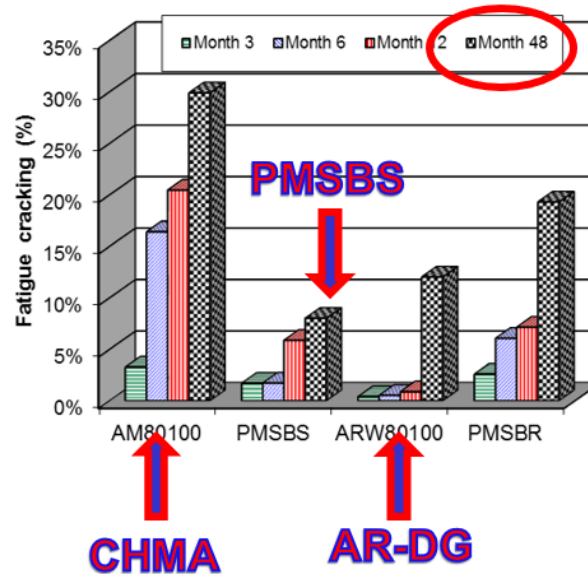
# PAVIMENTOS ASFÁLTICOS CON NFU Y SU LCA

## Comportamiento Mecánico

Primer Tramo de prueba a escala real con  
GCR en Colombia – Los Alamos

Bogotá Test Track - 2004

Performance After 4 years



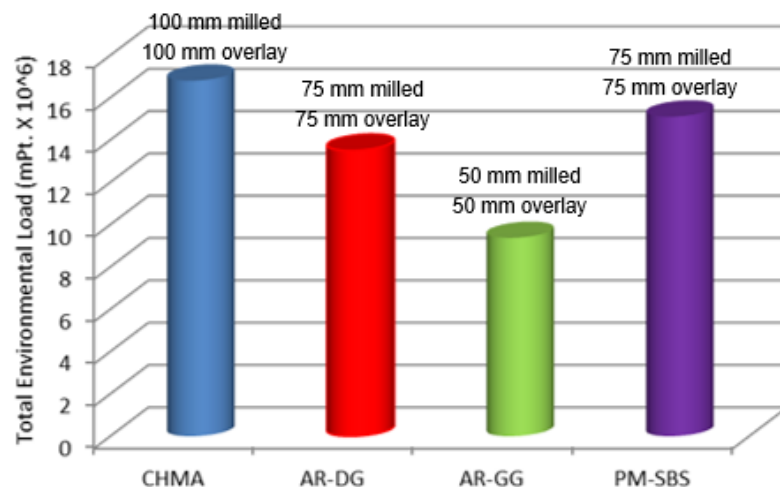
Martínez et al., 2009. Four years of Performance of a test track using crumb rubber asphalt and other modifiers.  
Proceedings of the Asphalt Rubber Conference 2009. Nanjing, China, November 2009.

# PAVIMENTOS ASFÁLTICOS CON NFU Y SU LCA

## Total Inventory Data

For 1 km 2 lane	CHMA 100 mm	AR-DG 75 mm	AR-GG 50 mm	PM-SBS 75 mm
Total volume compacted (m <sup>3</sup> )	700	525	350	525
Total volume loose (m <sup>3</sup> )	910	683	455	683
Total mass (kg)	1,540,000	1,128,750	712,250	1,134,000
Crush stone (kg)	873,180	632,100	462,963	637,308
Sand (kg)	582,120	421,024	192,308	425,250
Asphalt cement (kg)	84,700	64,339	45,584	68,040
Modifier (kg)	-	11,288	11,396	3,402
Milled volume (m <sup>3</sup> )	861	646	431	646
<b>HMA mixing plant</b>				
Electricity (kWh)	15,400	11,288	7,123	11,340
Heat oil (MJ)	438,900	386,033	243,590	387,828
<b>Machines consumption</b>				
Diesel (l) machines	1,681	1,489	992	1,489
<b>Modified Plant</b>				
Electricity (KWh)	-	517	365	457
No.2 diesel (l) (blender plant)	-	509	359	450
<b>Hauling</b>				
Total hauling m <sup>3</sup> km	102,806	76,154	49,086	76,252
Asphalt hauling (refinery) m <sup>3</sup> km	79,406	60,318	42,735	63,788

## Total Environmental Load for milling/overlaying

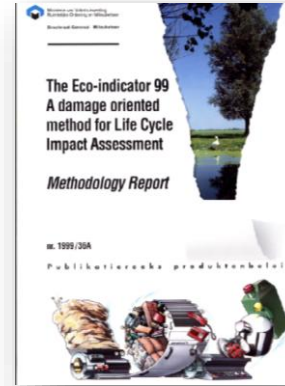
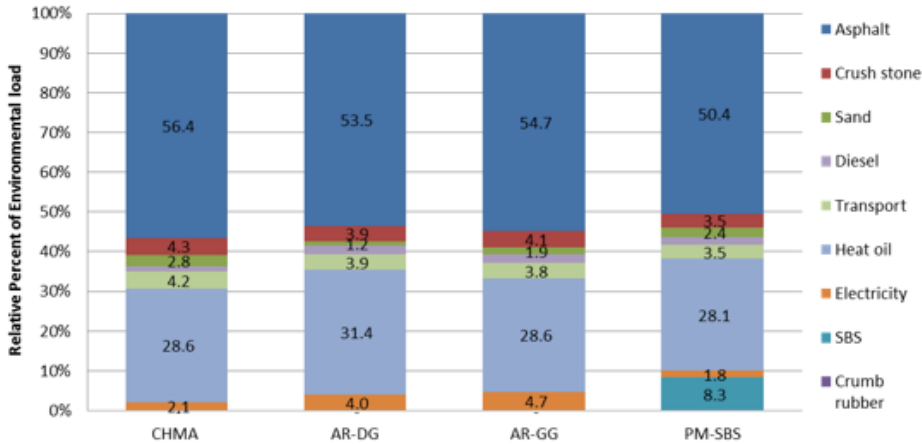


## Transportation Distances

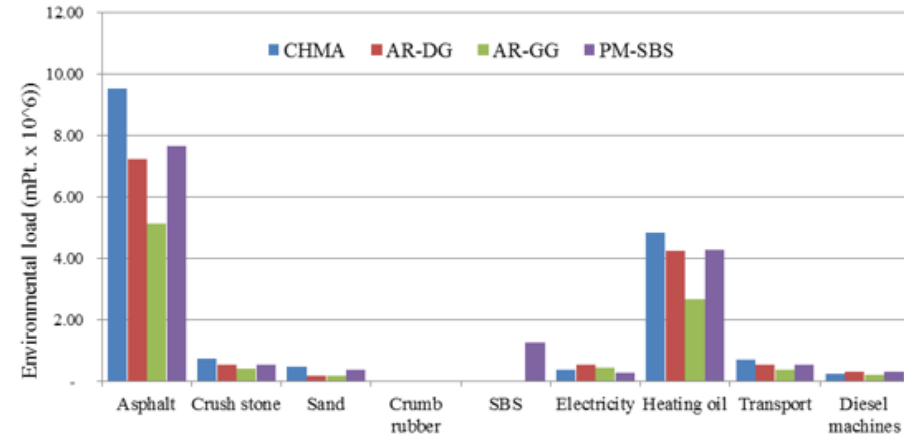
Section to be rehabilitated	1 km
Section width (two lanes)	7 m
Refinery - Asphalt mixing plant (round trip)	900 km
Quarry - Asphalt mixing plant (round trip)	20 km
Asphalt mixing plant - section to be rehabilitated	50 km
Crumb rubber/ SBS (modifier)	20

# PAVIMENTOS ASFÁLTICOS CON NFU Y SU LCA

## Relative Environmental Loads for milling/overlaying



## Environmental Loads for milling/overlaying two lane-kilometers of road pavement



Martinez-Arguelles, G., Crispino, M., Giustozzi, F., & Flintsch, G. W. (2013). *Environmental analysis of asphalt pavement maintenance using modified binders in developing countries: case study in Bogotá, Colombia* (No. 13-3475).

Un espacio para la tecnología, el conocimiento y el futuro del reciclaje

# PAVIMENTOS ASFÁLTICOS CON NFU Y SU LCA

## The environmental impact assessment of Asphalt Rubber: Life Cycle Assessment

Irene Bartolozzi\* - Ines Antunes\*\* - Francesco Rizzi\*

\* Sant'Anna School of advanced studies, Institute of management, Pisa Italy,  
PHD research fellow; i.bartolozzi@sssup.it, Assistant Professor, f.rizzi@sssup.it

\*\* PHD, Technical Director Asphalt Rubber Italia Srl, Pistoia Italy,  
ines.antunes@asphaltrubberitalia.it

### A) Asphalt rubber solution:

- 3 cm top layer AR Gap Graded (E=4200 MPa, with nominal maximum aggregate size of 12.5 mm): 8% AR bitumen (20% CRM) and 92% aggregates
- 6 cm binder layer AR Gap Graded (E=400 MPa, with nominal maximum aggregate size of 14 mm): 7.8% AR bitumen and 92.2% aggregates
- 10 cm base layer, conventional material (E=2500 MPa): 4% Bitumen 50/70 and 96% aggregates

For a total thickness of 19 cm.

### B) Conventional solution:

- 4 cm SMA top layer (E=4000 MPa): 6% Bitumen 50/70 and 94% aggregates
- 6 cm binder layer (E=3500 MPa, calcareous): 4.7% Bitumen 50/70 and 95.3% aggregates
- 12 cm base layer (E=2500 MPa, calcareous): 4% Bitumen 50/70 and 96% aggregates

For a total thickness of 22 cm.

Table 6. Results of environmental performances AR road/conventional road

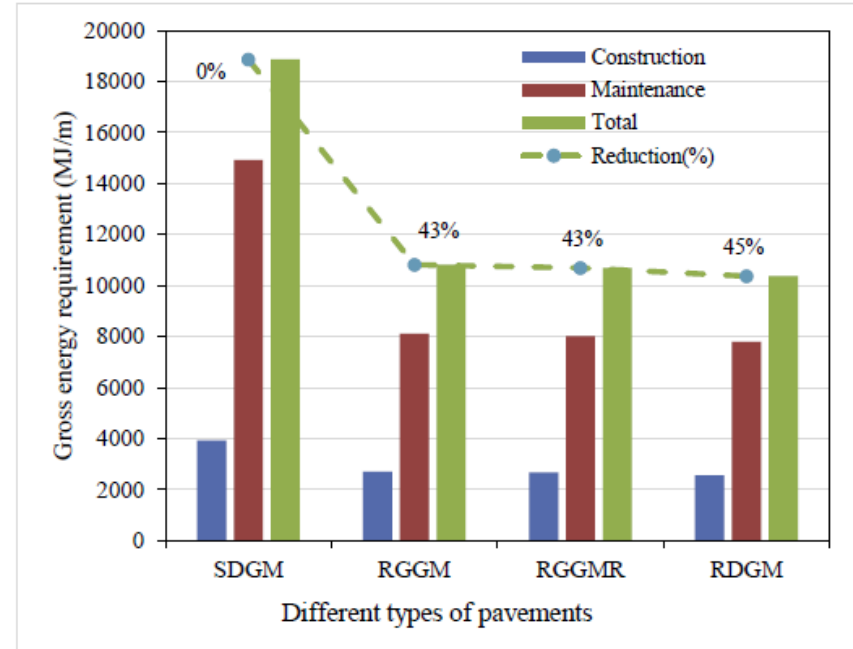
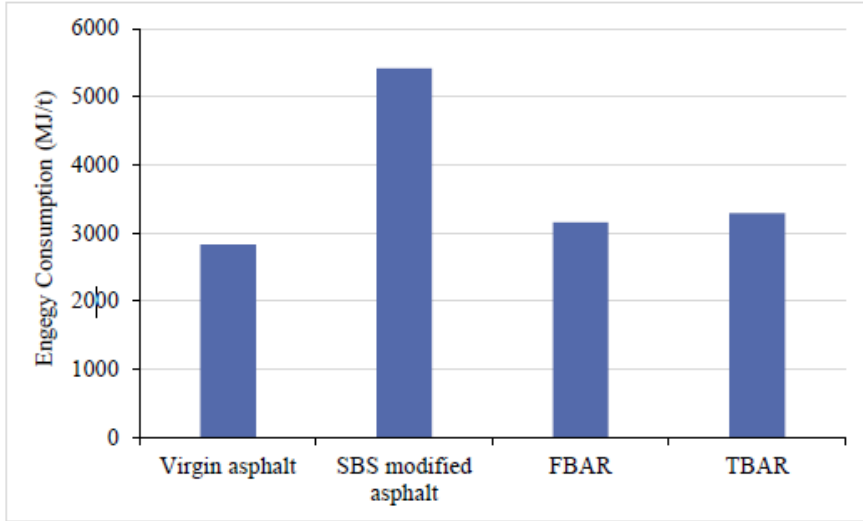
Impact category	Units	LCA AR road	LCA conventional road
Abiotic depletion	kg Sb eq	470,4820614	690,0650983
Acidification	kg SO <sub>2</sub> eq	200,6254185	292,4172741
Eutrophication	kg PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> eq	18,77488416	58,41962426
Global warming (GWP100)	kg CO <sub>2</sub> eq	31676,04318	46608,61182
Ozone layer depletion (ODP)	kg CFC-11 eq	0,008077139	0,011791892
Human toxicity	kg 1,4-DB eq	12503,81109	18077,84697
Fresh water aquatic ecotox.	kg 1,4-DB eq	4585,796209	6855,59203
Marine aquatic ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	12698961,68	18886861,13
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DB eq	128,1745591	191,8532325
Photochemical oxidation	kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq	9,103604073	13,37387651

30% menos GWP

- ❑ The advantage of AR technology is further improved over the entire life cycle, if we consider the longer life time of the AR road and the lower number of maintenance operations needed.
- ❑ These features allow for an improvement of about 30% for all the impact categories, in comparison with the conventional technology.



# PAVIMENTOS ASFÁLTICOS CON NFU Y SU LCA



❑ Rubberized asphalt mixtures during pavement rehabilitation had significant environmental benefits compared with traditional asphalt pavements.



JORNADAS RECICLAJE  
BOGOTÁ 2025

Wang, T., Xiao, F., Zhu, X., Huang, B., Wang, J., & Amirkhanian, S. (2018). Energy consumption and environmental impact of rubberized asphalt pavement. *Journal of Cleaner Production*, 180, 139-158.

# PAVIMENTOS ASFÁLTICOS CON NFU Y SU LCA

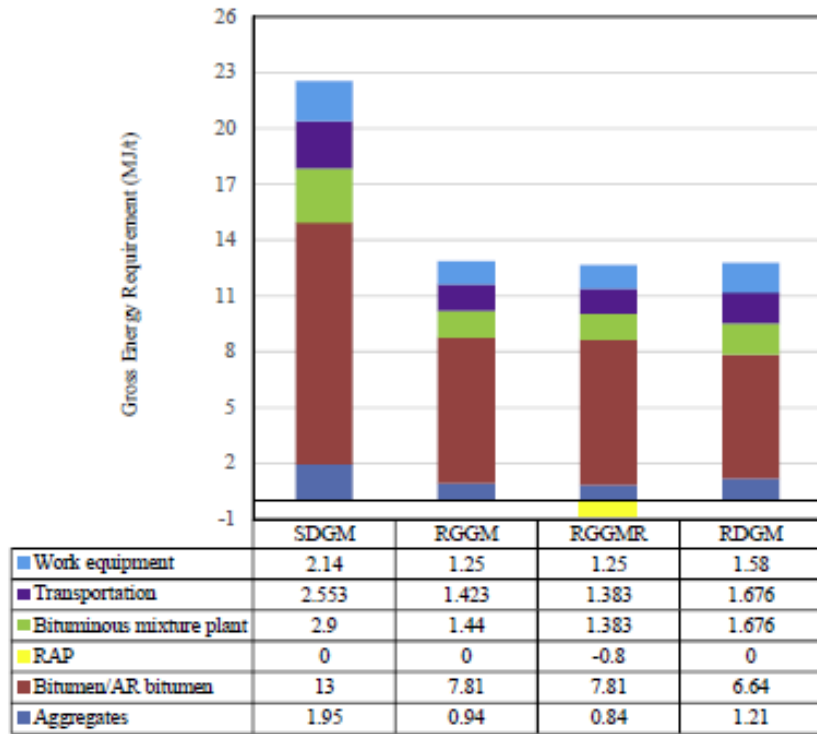


Fig. 6. Gross Energy Requirement associated to individual material and operations (Santero et al., 2011).

- ✓ **Cemento Asfáltico (bitumen):** aporta la mayor carga en energía.
- ✓ El mejor desempeño mecánico de las mezclas con **“Rubber”**, permiten grandes ahorros en volumen de materiales, transportes y consumos en maquinaria



# PAVIMENTOS ASFÁLTICOS CON NFU Y SU LCA

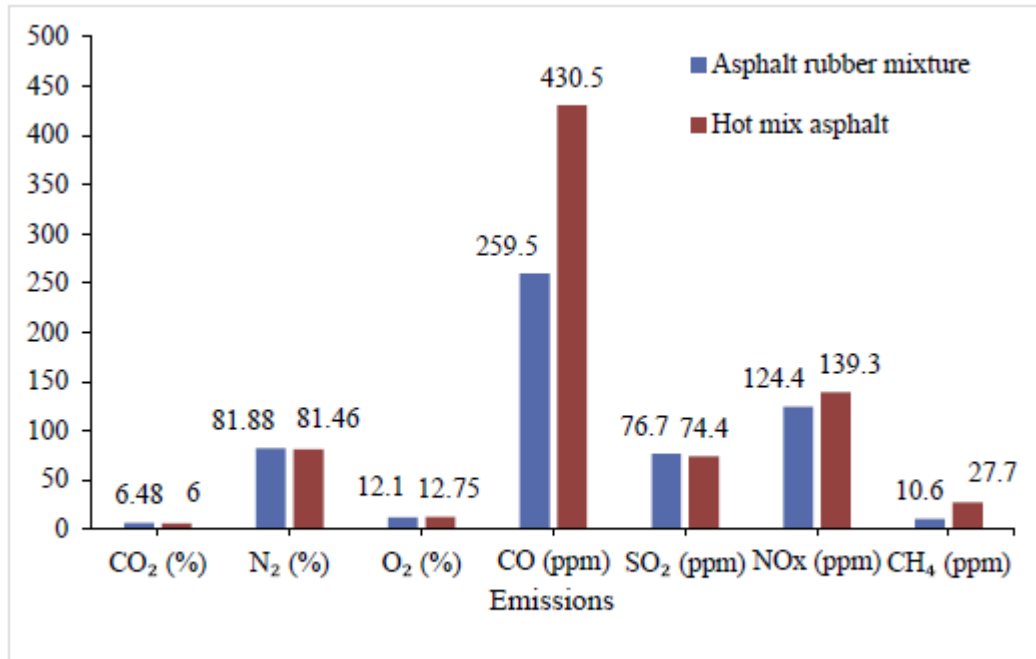


Fig. 9. Emissions measured during the production of the mixtures (Stout et al., 2003).

- ❑ Las emisiones de **O<sub>2</sub>**, **N<sub>2</sub>**, **CO<sub>2</sub>**, **NO<sub>x</sub>** y **SO<sub>2</sub>** provenientes de la producción de mezclas asfálticas con caucho fueron algo similares a las del asfalto en caliente (con un rango de +0.5 a -10.7%).
- ❑ Sin embargo, las emisiones de **CO** y **CH<sub>4</sub>** fueron mucho menores en las mezclas asfálticas con caucho.

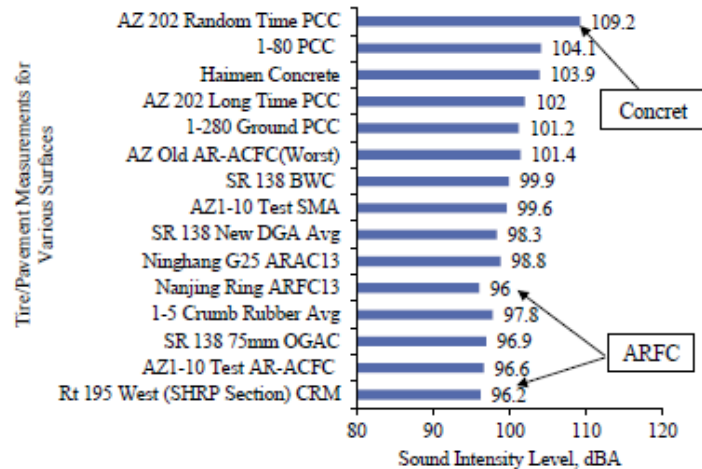


# PAVIMENTOS ASFÁLTICOS CON NFU Y SU LCA

**Table 9**

Sound studies of using rubberized asphalt and resulting noise reduction (Donavan, 2005; SCPWA, 1999; Way et al., 2012).

Country	Noise Level Reduction	Country	Noise Level Reduction
Belgium	8-10 dB (65-85%)	Phoenix, AZ	10 dB (88%)
Canada	Shown noise reduction	Tucson, AZ	6.7 dBs (78%)
France	2-3dB/3-5 dB (50-75%)	Sacramento County	7.7 dB
Germany	3 dB (50%)	Orange County	3-5 dB on Open Graded asphalt
Austria	3 + dB	Los Angeles County	3-7 dB
China	Significant noise reduction	Arizona, USA	9dB



**Fig. 13.** Sound Intensity Level of Tire/Pavement Measurements for Various Surfaces (Bennert et al., 2005; SCPWA, 1999; Way et al., 2012). Notes: ARFC = asphalt rubber friction course; ARAC = asphalt rubberized asphalt concrete; PCC= Portland cement concrete; CRM= crumb rubber modifiers; OGAC=Open Graded Asphalt Concrete; SMA = stone mastic asphalt.

Wang, T., Xiao, F., Zhu, X., Huang, B., Wang, J., & Amirkhanian, S. (2018). Energy consumption and environmental impact of rubberized asphalt pavement. *Journal of Cleaner Production*, 180, 139-158.



# CONCLUSIONES

- ❑ El uso de caucho molido en el asfalto presenta **grandes beneficios en ahorro de energía y efectos ambientales**, en comparación con la **disposición en vertederos o la recuperación energética**.
- ❑ La producción convencional de asfalto con caucho es un **proceso de alto consumo energético**, ya que su **alta viscosidad requiere mayores temperaturas y tiempos de mezclado más prolongados**. Su desempeño durante la vida útil y los menores espesores de diseño balancean y superan significativamente el desempeño ambiental de las mezclas convencionales.
- ❑ Las **soluciones con asfalto caucho (AR)** presentan un **mejor desempeño estructural y funcional** que la solución original. De hecho, **pueden soportar un tráfico mayor al previsto y tener una vida útil más prolongada**.
- ❑ La **reducción del ruido** en los **pavimentos asfálticos con caucho** es uno de sus **beneficios ambientales**, ya que permite **disminuir entre un 40 % y un 88 % del ruido generado por la interacción neumático-pavimento** en el rango de frecuencias de **500 a 4000 Hz**, en comparación con un pavimento tradicional.



# CONCLUSIONES

- ❑ Las emisiones de O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> y SO<sub>2</sub> durante la producción de mezclas asfálticas con caucho generalmente son algo similares a las de la producción de mezclas convencionales con asfalto en caliente.
- ❑ Desde la óptica del **ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA**, los beneficios deben ser estimados durante todo el CICLO DE VIDA, esto es a largo plazo. Dado que la carga ambiental inicial eventualmente puede mostrar valores superiores para la mezclas con NFU.
- ❑ Las principales ventajas y ahorros se observan durante la etapa de operación con menos actividades de mantenimiento y/o rehabilitación, menos ruido y mayor desempeño a la fatiga y al reflejo de grietas.



# AGRADECIMIENTOS

- ❑ Comité Académico de las IV Jornadas Latinoamericanas de Reciclaje de Neumáticos.
- ❑ A los Dres. Karina Potarsky, Marly Jacoby, Gerardo Botasso.

# Thanks, grazie, mercy, gracias!!



Local flower from Barranquilla



Carnival at Barranquilla

## Questions?

[garguelles@uninorte.edu.co](mailto:garguelles@uninorte.edu.co)



JORNADAS RECICLAJE  
BOGOTÁ 2025



# JORNADAS RECICLAJE

B O G O T Á 2 0 2 5

**Gracias /** Thank you