



# **SOBRECARGA: UN FACTOR CRÍTICO EN LA RESILIENCIA DE LOS PAVIMENTOS**

Paul Garnica Anguas<sup>1</sup>

<sup>1</sup> CIID, Centro de Investigación, Innovación y Desarrollo en Infraestructura y Seguridad Vial, México, [paulgarnica@ciid.com.mx](mailto:paulgarnica@ciid.com.mx)

## **Resumen**

En este artículo el autor presenta un análisis del fenómeno de la sobrecarga y sus efectos en los pavimentos, activos clave en la infraestructura carretera, desde un punto de vista del concepto de resiliencia. Se presentan mediciones de pesos en los vehículos de carga utilizando estaciones de pesaje WIM móviles y su descripción a través de espectros de carga, donde se establece claramente la existencia de sobrecargas en la red federal de carreteras en México. Se definen espectros de carga sintéticos para diferentes escenarios de sobrecarga que se utilizan en cálculos mecanicistas de la vida remanente en términos de fatiga. Se cuantifican económicamente los sobrecostos asociados a cada escenario de sobrecarga. Se discuten los resultados y las posibles soluciones al problema.

**Palabras Clave:** Sobrecarga, pavimentos, resiliencia

## **1 Introducción**

Hoy día se habla mucho del concepto de resiliencia en el sentido de nuestra habilidad para anticipar, preparar y adaptarse a las condiciones cambiantes, y resistir, responder y, sobre todo, recuperarse rápidamente de cualquier perturbación [1]. Cuando se trata de infraestructura carretera, las perturbaciones se suelen referir a inundaciones por lluvias extremas, o sequías prolongadas, elevación del nivel del mar, nevadas extraordinarias, incendios, temperaturas extremas y, en general, fenómenos climáticos [1]. En muchas redes carreteras, hay otro factor en particular, afectando la vida y durabilidad de los pavimentos, y que actúa en forma silenciosa e inclemente, a la vista de todos y sin que pareciera que alguien lo considere relevante: la sobrecarga.

Hay una analogía entre el sistema circulatorio en el cuerpo humano y el sistema carretero de un País. Y es que a través del sistema circulatorio se mueven nutrientes, oxígeno y hormonas a todas las células y órganos del cuerpo y permite además la eliminación de productos de desecho. Un mal funcionamiento de este sistema, como el que provoca el sobrepeso en una persona, induce una serie de problemas muy graves que llevan a accidentes cardiovasculares y a la aparición de otras enfermedades que afectan la calidad de la vida misma y muchas veces terminan con ella. En México, un gran número de personas tienen sobrepeso. En el caso de las carreteras, el sistema carretero nacional de un País conecta los distintos puntos geográficos del territorio y facilita la comunicación y la movilidad de personas, bienes y servicios, que se requieren para hacer funcionar el engranaje de la economía nacional. Un mal funcionamiento de este sistema, como el que provoca el sobrepeso de los numerosos vehículos de carga que circulan en él, induce una serie de problemas muy graves que llevan no solo a incrementos de los costos de conservación y operación de una carretera, sino afectaciones en los tiempos de recorrido, molestias a los usuarios y en muchos casos accidentes que afectan la calidad de la vida misma y muchas veces terminan con ella. En México, un gran porcentaje de la red federal de carreteras lleva sobrepeso.



En el caso del sobrepeso en las personas, el sector salud nos dice que la obesidad no es curable pero que se puede controlar. Esto involucra un gran reto para las personas afectadas que desean mejorar su estado de salud (resiliencia). Al fin y al cabo, es una responsabilidad individual. En el caso del sobrepeso en las carreteras, el sector transporte nos informa donde y en que magnitud existen vehículos sobrecargados, pero la cuestión es quién es el responsable de velar por la salud del sistema carretero, y así eliminar o al menos controlar ese sobrepeso. Si la infraestructura carretera es propiedad de la Nación, el responsable es el gobierno, federal, estatal, municipal, en forma directa o través de un tercero, es quién debe asumir la obligación de cuidarla y preservarla. En México hay incluso una norma obligatoria que establece con claridad los pesos máximos totales y por eje de cada tipo de vehículo que circula sobre la red de carreteras. Sin embargo, las mediciones demuestran que el sobrepeso existe y en gran magnitud.

En lo que sigue, se demuestra el efecto de la sobrecarga en la durabilidad de corredores carreteros en México y la dificultad para establecer políticas de resiliencia.

## 2 Evidencia de la enfermedad: Sobrecarga

Peter Drucker decía “lo que no se mide, no se controla, y lo que no se controla, no se puede mejorar”. Si no se mide lo que se hace, no se puede controlar y si no se puede controlar, no se puede dirigir y si no se puede dirigir no se puede mejorar.

En México existe un Estudio Estadístico de Campo del Autotransporte Nacional, el cual desde 1990 recopila información de las cargas por eje de los principales tipos de vehículos de carga que circulan por la red federal libre de peaje.

Un espectro de carga es la distribución normalizada de la carga de un cierto tipo de eje (Sencillo, Dual, Tándem, Trídem). Como ejemplo, en las Figura 1 se muestran los espectros de carga para el eje sencillo, eje dual, eje tándem y eje trídem, en dos estaciones del país, reflejando los niveles de sobrecarga existente, sobre todo en los corredores hacia los Estados Unidos. La línea vertical representa el límite de carga por tipo de eje en toneladas. Un mayor detalle en la interpretación de estos espectros se puede encontrar en [3].

Con esta información se puede calcular, entre otras cosas, el Factor de Espectro de Carga [3] conocido como *LSF*, *Load Spectral Factor*, que es un indicador que cuantifica el potencial de daño de un espectro de carga dado. Este se calcula bajo la expresión matemática que se indica en la ecuación (1).

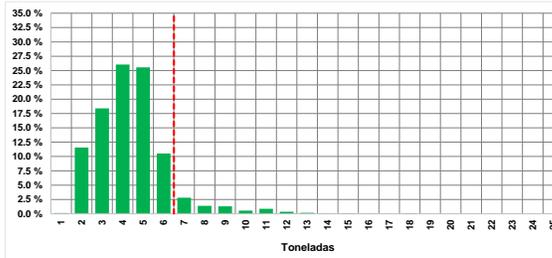
$$LSF = \sum_{i=1}^l \left( \frac{x_i}{L_s} \right)^m f_i \quad (1)$$

en donde *LSF* es el Factor de Espectro de Carga, *l* es el número total de intervalos del espectro, *i* es el número de intervalo de clase, *x<sub>i</sub>* es la marca de clase, *L<sub>s</sub>* la carga estándar para el tipo de eje, *m* el orden y *f<sub>i</sub>* la frecuencia normalizada.

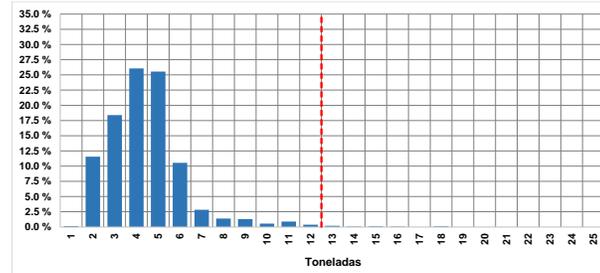
Para fines ilustrativos, en la Figura 2 se presentan los valores del *LSF* calculados en un cierto corredor carretero, para el eje tándem únicamente, siendo el tipo de eje más representativo de los vehículos de carga en México. El uso de este parámetro único para caracterizar un espectro de carga permite hacer un estudio comparativo de la agresividad del tránsito vehicular en función del tiempo y el espacio. El análisis permite establecer aspectos como la agresividad del tránsito vehicular ha sido creciente en promedio desde el año 2005. Con los datos disponibles, debe ser clara la necesidad de considerar los niveles de carga reales del tránsito vehicular para cualquier efecto de planear, diseñar, conservar y operar la red federal de carreteras.



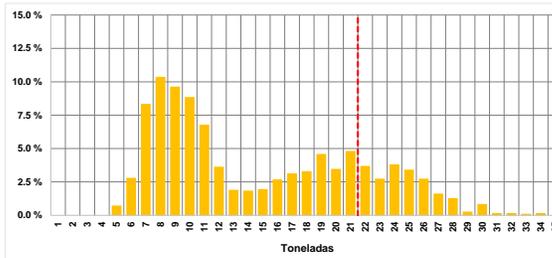
a) Eje sencillo



b) Eje dual



c) Eje tándem



d) Eje tridem

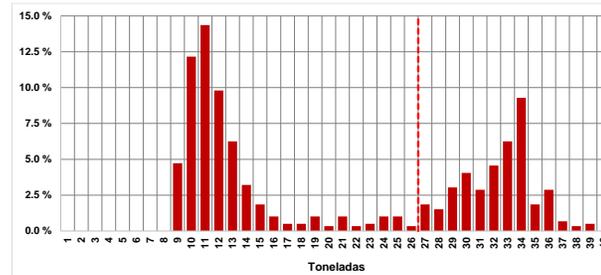


Figura 1. Espectros de carga en una cierta estación de pesaje en alguno de los principales corredores carreteros de México

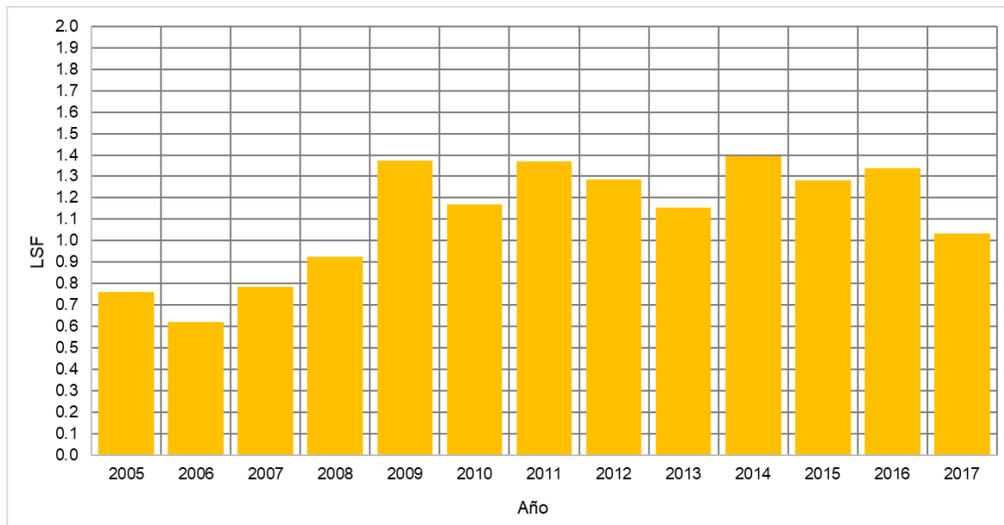


Figura 2. Factor de Espectro de Carga por año para el eje tándem en un cierto corredor carretero.



### 3 Diagnóstico de la enfermedad: menor vida remanente

La vida útil de los activos de la infraestructura carretera depende de numerosos factores de diseño, construcción, mantenimiento, medioambientales y operativos. Dentro de estos factores, el uso de los activos de la carretera por parte de los vehículos de carga juega un papel sustancial. La interacción entre esos vehículos y los pavimentos es compleja, no solo por la amplia gama de actividades, tipos y configuraciones de camiones, cargas y características físicas y operativas, sino también porque el estado del pavimento influye en las cargas dinámicas impuestas por los vehículos que lo utilizan. Por consiguiente, el diseño y la gestión eficaces de los activos de las carreteras dependen de la comprensión de cómo estas características e interacciones influyen en la vida útil de los activos. Los esfuerzos de investigación y desarrollo, principalmente en el ámbito de la ingeniería civil, siguen mejorando esta comprensión [4].

La figura 3 ilustra conceptualmente la relación entre la demanda de transporte por carretera y el deterioro de los activos viales. Como se muestra en la Figura 3(a), el movimiento de personas y de mercancías comprende la demanda total de transporte por carretera. Mientras que la demanda de transporte de mercancías representa una parte minoritaria de esta demanda (cuando se mide en términos de la distancia total recorrida en una red), los camiones que sirven a esta demanda causan una parte desproporcionadamente alta del deterioro de los activos de las carreteras. Una relación similar es evidente cuando se considera la demanda de transporte de mercancías por carretera, como se muestra en la Figura 3(b). En este caso, los camiones que transportan cargas anormales causan una proporción relativamente más alta de deterioro de los activos de las carreteras en comparación con los camiones que transportan cargas normales, a pesar de que sirven una proporción relativamente pequeña de la demanda total de transporte de mercancías por carretera [4].

La figura 3(b) también ilustra conceptualmente la distinción entre dos componentes del deterioro de los activos viales: el "desgaste" y el "daño". Los activos viales están diseñados para desgastarse. El desgaste de los activos viales se produce cuando los camiones que transportan cargas normales o anormales respetan los límites máximos de carga por eje y total considerados en el proceso de diseño. En cambio, los daños (representados conceptualmente con el sombreado rojo en el diagrama) se producen cuando las cargas normales o anormales superan los límites máximos permitidos y tienen el potencial de ser responsables de una parte desproporcionadamente alta del deterioro de los activos de la carretera y de los costos de mantenimiento.

Para ilustrar el efecto de la sobrecarga en la vida remanente de una carretera se realizó un ejercicio en los corredores carreteros nacionales tomando de referencia los datos de capacidad estructural del año 2018, en donde se reportan datos de tránsito vehicular, espesores y tipo de materiales presentes en las secciones estructurales de los pavimentos y los valores de los módulos retrocalculados para cada capa. El análisis de vida remanente se realizó con una metodología mecanicista, en donde se calculan las deformaciones críticas en el pavimento, y se calcula un coeficiente de daño acumulado ante el paso de cada uno de los ejes de cada uno de los vehículos de carga que circulan en el período de diseño [2]. El análisis realizado fue además probabilista, tomando en cuenta un coeficiente de variación del 15% para los módulos de cada capa y un nivel de confiabilidad de 90%. Lo importante aquí es que se consideraron espectros de carga sintéticos pero representativos de varios escenarios de sobrecarga que solemos encontrar: legal, ligera sobrecarga, alta sobrecarga y muy alta sobrecarga. En la Figura 4 se muestran los espectros sintéticos utilizados para el eje de carga tándem, los otros tipos de eje son los sencillos, duales y trídems. En esa figura se muestra el límite legal para ese eje tándem que es de 18.5 ton.

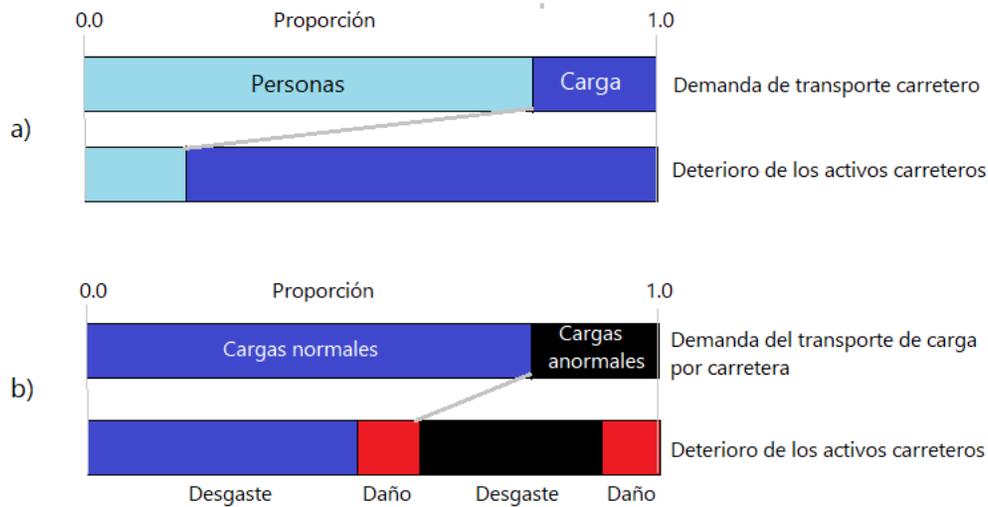


Figura 3. Relación entre demanda del transporte por carretera y el deterioro de sus activos [4]

En la Figura 5 se muestran los resultados obtenidos de los cálculos de vida remanente por fatiga para varios de los corredores carreteros analizados. En cada caso se compara con promedio nacional que corresponde a la frontera superior del área marcada en azul. Se pueden notar casos de corredores carreteros en los que la vida remanente es menor o mayor que el promedio nacional, e incluso un corredor en donde la vida remanente es independiente del nivel de sobrecarga. Esto es función, por supuesto, de la sección estructural de pavimento en cada corredor.

#### 4 Consecuencias de la enfermedad: mayores costos

El efecto de la sobrecarga se aprecia en la disminución de la vida remanente de los pavimentos, y por supuesto tendrá consecuencias en los costos de conservación, rehabilitación y operación de la infraestructura. Para estimar un costo asociado a la pérdida de vida remanente calculada, para cada uno de los escenarios de sobrecarga y en cada uno de los corredores carreteros, se calculó el espesor adicional de la capa asfáltica necesario para que cumpliera con 15 años de vida remanente y se calcularon los sobrecostos asociados que se muestran en la Figura 6 para una sección de 10 m de ancho y la longitud de cada tramo. En el escenario de carga legal los sobrecostos no aparecen porque son nulos, como además es el caso para el corredor 4 en donde su sección estructural es suficientemente resistente en todos los casos. En los demás corredores carreteros el sobrecosto es naturalmente mayor a medida que la sobrecarga es mayor. Estamos hablando de sobrecostos de hasta 250 millones de dólares para 1000 km del corredor 3, y es solo un corredor. El sobrecosto total para los 14,760 km de corredores carreteros en un escenario de muy alta sobrecarga sería del orden de 1,825 millones de dólares. Como referencia, el costo total estimado de los activos de la red federal de carreteras en México (estimada en 45,000 km) es de 50,000 millones de dólares. Entre el 2005 y el 2016, el costo promedio anual de los daños causados por huracanes, tormentas y lluvias intensas fue de 2,480 millones de dólares. Sólo en el 2013, los daños extremos causados por los huracanes Ingrid y Manuel fueron del orden de 4,500 millones de dólares (agua.org.mx). En el 2019, los costos

asociados a los accidentes automovilísticos, fue del orden del 2.2% del PIB (OCDE, 2019), es decir unos 21,400 millones de dólares.

Con lo anterior se puede entender la dificultad de un País en que una gran parte de la red carretera se ha deteriorado de esta manera por efecto de la sobrecarga y como al acumularse en tiempo genera sobrecostos que son comparables a los que ocasionan fenómenos hidrometeorológicos extremos. La diferencia es que mientras los efectos y costos de un fenómeno natural extremo están localizados en el espacio y en el tiempo, los asociados a la sobrecarga están distribuidos en el espacio y en tiempo, pero son por igual de gran impacto para la sociedad.

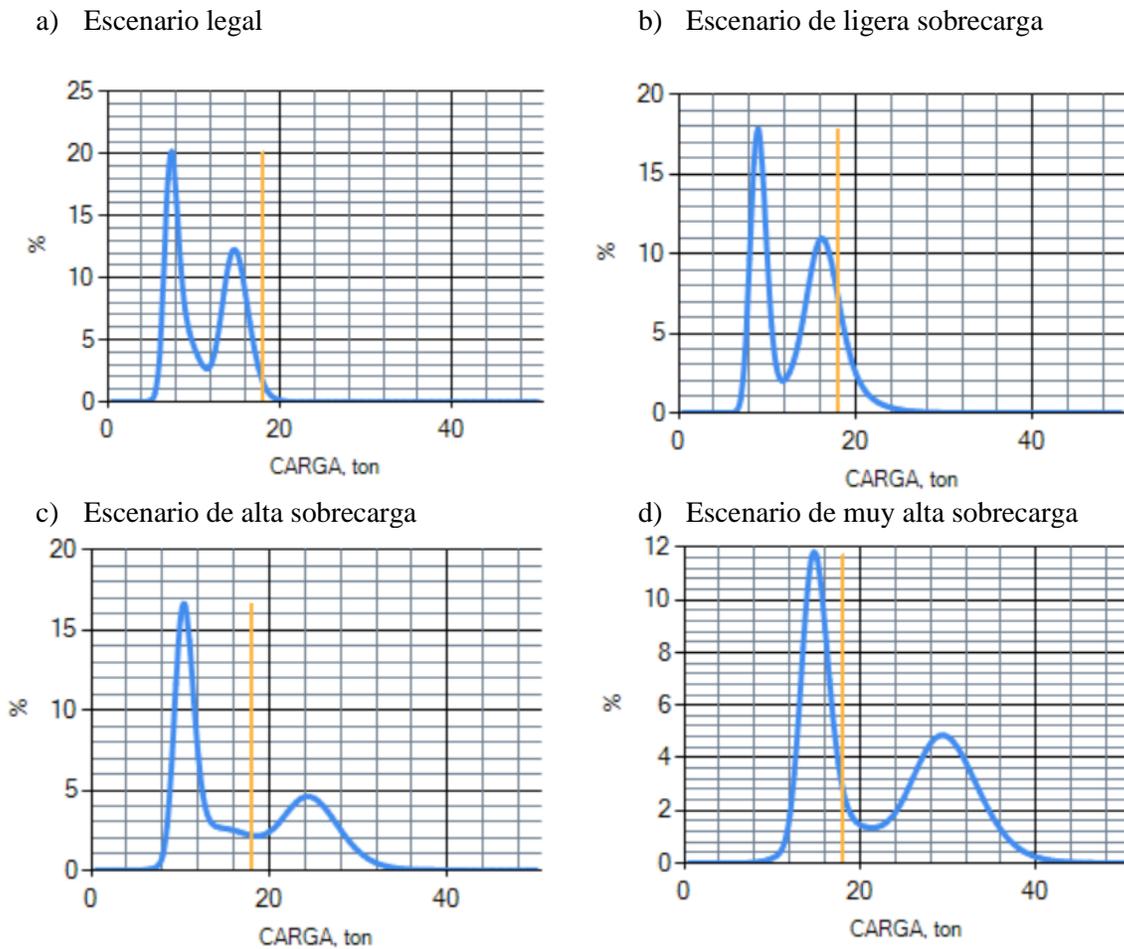
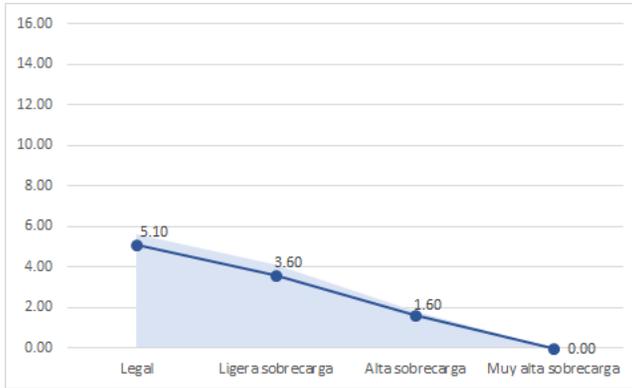


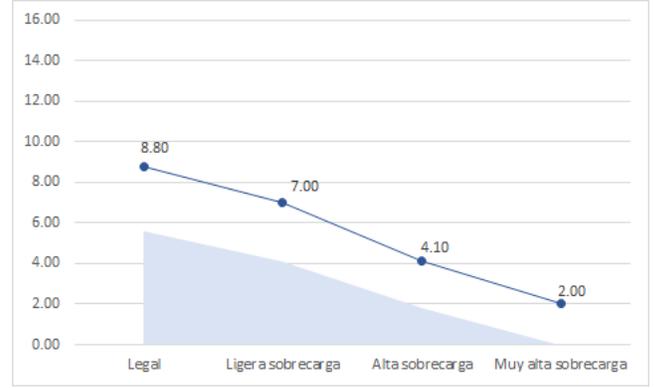
Figura 4. Espectros de carga sintéticos para el eje tándem en cuatro escenarios de sobrecarga



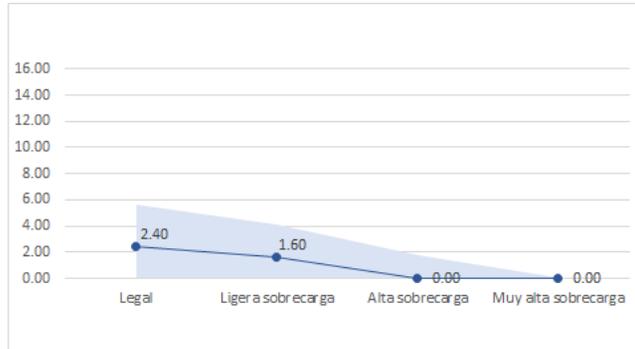
a) Corredor carretero 1



b) Corredor carretero 2



c) Corredor carretero 3



d) Corredor carretero 4

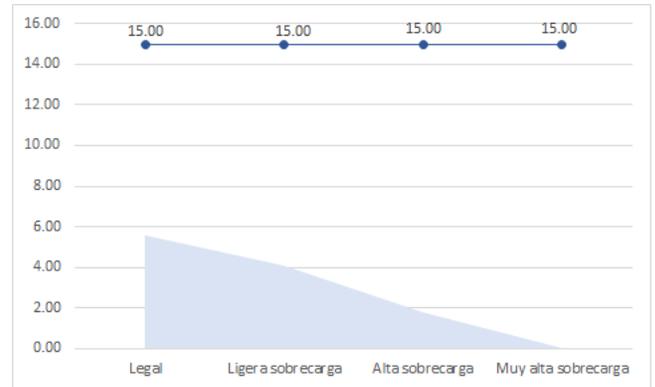


Figura 5. Cálculos de vida remanente por fatiga de cuatro corredores carreteros para cuatro escenarios de sobrecarga

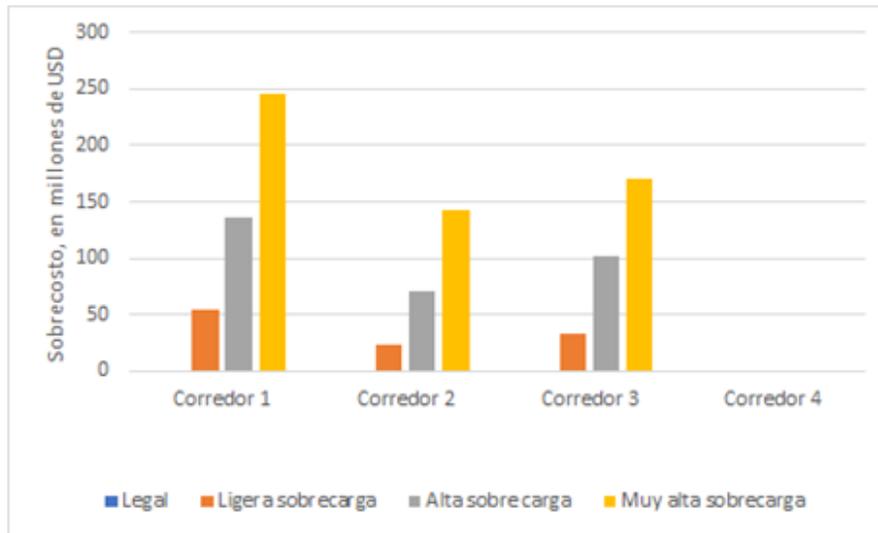


Figura 6. Sobrecostos asociados a la reconstrucción de pavimentos en cada corredor y para cada escenario de sobrecarga

## 5 Conclusiones: tratamiento de la enfermedad

Ahora bien, la solución no pasa por una única política coercitiva para obligar al cumplimiento de la norma, tenemos que ir más allá. Para ser resilientes, es necesario un nuevo marco político para mantener y gestionar los activos viales de forma rentable y satisfacer la demanda de transporte de mercancías por carretera de forma sostenible. Por ejemplo, necesitamos una buena comprensión de las razones del incumplimiento de los límites de peso permitidos para los vehículos pesados que permita seleccionar el enfoque correcto para un marco de cumplimiento eficaz. Para incentivar a los operadores de transporte a cumplir la normativa, las medidas podrían incluir mecanismos de acreditación y autorregulación, enfoques avanzados para gestionar el peso de los vehículos, así como el uso de la telemática y las tecnologías inteligentes relacionadas. Necesitamos comunicarnos con los transportistas y trabajar en conjunto [4].

Si tomamos la definición de resiliencia presentada al inicio de este trabajo, y aplicándola al problema de la sobrecarga, podríamos expresar lo siguiente:

1. Anticipar: Hay que medir con estaciones de pesaje WIM los pesos reales por eje de los vehículos de carga que circulan en todo tramo carretero.
2. Preparar: Hay que evaluar las consecuencias de la sobrecarga en la pérdida de la vida de los pavimentos y los sobrecostos asociados.
3. Adaptar: Elaborar políticas públicas que permitan una autorregulación de peso de los vehículos por parte de las empresas transportistas e implementar nuevas tecnologías en los vehículos.
4. Resistir: Hay que diseñar estructuras de pavimento acordes a las condiciones reales de tránsito vehicular a través de la utilización de los espectros de carga y metodologías mecanicistas.



5. Responder: La autoridad responsable de cada red carretera debe implantar las medidas equilibradas necesarias para sensibilizar a las partes interesadas de la conveniencia de operar la red en condiciones adecuadas de pesos y dimensiones, y cumplir la legislación existente.
6. Recuperarse: La mejor forma de recuperarse y mantenerse en buena salud, es un compromiso permanente en la profesionalización de la gestión de los activos viales por todas las partes interesadas.

## 6 Referencias

[1] Bowers B.F., Gu F. (2021). Asphalt Pavement: A Critically Important Aspect of Infrastructure Resiliency. NCAT Report 21-02.

[2] Garnica P. (2019). Espectros de carga y daño en diseño de pavimentos para condiciones muy pesadas del tránsito vehicular. XVI Congreso Mundial de la Carretera. PIARC. Abu Dabi, Emiratos Árabes Unidos.

[3] Prozzi J. et al (2006). Optimal Statistical Characterization of WIM data bases on pavement impact. Proceedings of the 86th Annual Meetings of the Transportation Board. Unites States.

[4] TF (2018). Policies to Extend the Life of Road Assets. International Transport Forum. Research Report.