

APLICACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN WEIBULL PARA ESTIMAR LA VIDA REMANENTE DE PAVIMENTOS FLEXIBLES

Nazario D. Ramírez Beltrán¹ y Benjamín Colucci²

RESUMEN: La Guía de Diseño para Estructuras de Pavimentos de la AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993) utiliza el concepto de vida remanente para determinar el espesor de recubrimiento asfáltico que requiere un pavimento flexible en servicio. El cálculo del recubrimiento está basado en la relación de las cargas acumuladas de transporte al momento del análisis con respecto a las cargas acumuladas de transporte requeridas para que el pavimento alcance el nivel terminal de servicio. En este artículo, se propone un procedimiento analítico para estimar la vida remanente de un pavimento flexible el cual se encuentra en servicio. La metodología propuesta es especialmente útil cuando la información disponible de tráfico y del desempeño del pavimento es limitado. La distribución Weibull se utiliza para estimar las cargas acumuladas de transporte requeridas para lograr que el pavimento alcance el nivel terminal de servicio. La carga de transporte acumulada hasta el tiempo en que se realiza el análisis es estimada utilizando la función de desempeño del pavimento la cual se ha desarrollado basándose en las mediciones de rugosidad y condiciones climáticas. Debido a que los efectos de las cargas que recibe el pavimento varían de acuerdo a las características ingenieriles de los suelos y de las condiciones climáticas, los parámetros de la distribución Weibull han sido diseñados para cada región climatológicamente homogénea. Un grupo de expertos en el campo de la transportación y diseño de pavimentos han colaborado para establecer los valores esperados y el rango de variación de las cargas acumuladas requeridas para alcanzar el nivel terminal del pavimento para cada región. Se utilizó la técnica de simulación Monte Carlo para determinar los parámetros de la distribución Weibull a fin de que éstos vayan en armonía con las opiniones de los expertos y así poder desarrollar las curvas de sobrevivencia que revelen la opinión de los expertos. Las curvas de sobrevivencia para cada región nos ayudan a determinar las cargas acumuladas requeridas para alcanzar el nivel terminal del pavimento y consecuentemente, poder estimar la vida remanente y el espesor de recubrimiento requerido.

INTRODUCCION

Las condiciones climáticas de una región tropical, tales como la precipitación y el drenaje inadecuado tanto en la base como la sub-base del pavimento crean serios daños a la estructura del pavimento, lo cual afecta significativamente su desempeño y la vida útil. Aunque Puerto Rico es una isla pequeña (100 x 35 millas), esta tiene diferentes regiones climatológicas. La zona lluviosa se extiende desde el noroeste al noreste, la zona húmeda se ubica en el norte, y la región seca en el sur. Estas regiones están separadas por las montañas conocida como la Cordillera Central que cubre la parte central de la isla.

Es importante notar que Puerto Rico no cuenta con un sistema ferroviario, así que las carreteras se usan para transportar productos muy pesados los cuales exceden los límites de diseño del pavimento reduciendo significativamente la vida útil de las mismas.

Se utilizaron técnicas estadísticas de clasificación para identificar cuatro regiones climatológicamente homogéneas en Puerto Rico (Colucci, et al., 1997). Se identificó una función genérica que representa el desempeño del pavimento en esa región.

Basándose en las opiniones de expertos en el campo de transportación y pavimentos se desarrolló un modelo para cada región que exprese la confiabilidad del pavimento. La función de confiabilidad es útil para estimar la vida remanente del pavimento. Existen varios modelos probabilísticos que pueden ser usados para representar la confiabilidad. La función de confiabilidad relaciona las cargas acumuladas de ejes sencillos equivalentes a 18,000 lbs que recibe el pavimento contra la probabilidad de no alcanzar el nivel terminal de servicio; esto es que durante ese período de tiempo la carretera tendrá un nivel de servicio superior al nivel terminal.

Las distribuciones de probabilidad más comunes que se pueden utilizar para representar la función de confiabilidad o de sobrevivencia son: la Exponencial, la Normal, la Logarítmica-normal, la Gama y la Weibull (Kapur and Lamberson, 1977). La distribución Weibull ha sido seleccionada en este estudio debido a que esta tiene capacidad para representar razones de fallas de los pavimentos flexibles, ya sean del tipo funcional o estructural (Kapur and Lamberson, 1977; Lapin, 1990).

Una vez identificados los parámetros de la distribución Weibull, ésta se usa para estimar la carga acumulada en términos de ejes sencillos equivalentes de 18,000 lbs ($ESAL_{18}$) requerida para alcanzar el nivel terminal de desempeño

¹Catedrático, Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad de Puerto Rico, Recinto Universitario de Mayagüez, Mayagüez, Puerto Rico.

²Catedrático, Departamento de Ingeniería Civil y Agrimensura, Universidad de Puerto Rico, Recinto Universitario de Mayagüez, Mayagüez, Puerto Rico.

del pavimento. Es conveniente notar que los métodos probabilísticos son apropiados para estimar la vida remanente del pavimento ya que la variable de la carga de tráfico acumulado es una variable aleatoria. Las curvas genéricas de desempeño para cada región son usadas para estimar el $ESAL_{18}$ acumulado. Una vez estimadas estas dos cargas la vida remanente de un pavimento específico se puede determinar. Así también, el espesor de recubrimiento requerido para un segmento de carretera que se encuentra en uso se puede determinar después de haber estimado la vida remanente y las condiciones estructurales del mismo (AASHTO, 1993).

En este estudio se sugiere una metodología general para desarrollar las curvas de desempeño y sobrevivencia de las carreteras de Puerto Rico, estas curvas presentan la información necesaria para estimar la vida remanente de un segmento de carretera el cual se encuentra en servicio. Es conveniente notar que las curvas de desempeño establecen una relación de las cargas recibidas por el pavimento y el nivel de servicio observado en la misma (Shahin, 2000). Las curvas de sobrevivencia muestran la posibilidad de que una carretera opere con un nivel de servicio por encima del nivel terminal para una carga de transporte previamente especificada.

DESCRIPCION DE LA METODOLOGIA

La metodología que se desarrollo como parte de esta investigación consiste en siete actividades fundamentales:

1. Utilizar el método Delphi para estimar los parámetros de la distribución de probabilidad que modela las cargas acumuladas para alcanzar el nivel de servicio terminal.
2. Desarrollar las curvas de sobrevivencia y estimar la carga requerida para lograr el índice terminal, dada una probabilidad de sobrevivencia.
3. Estudiar las características estructurales y la rugosidad del pavimento para estimar el nivel de servicio actual de las carreteras.
4. Utilizar la curva de desempeño para la región climatológica y poder estimar la carga acumulada de tráfico al momento del estudio.
5. Se utilizan las cargas acumuladas previamente descritas para estimar la vida remanente.
6. Determinar el factor de condición dependiendo de la estructura del pavimento.
7. Estimar el espesor de recubrimiento requerido para que un segmento de carretera sobreviva un tiempo previamente determinado.

La metodología propuesta se describe de manera esquemática en la Figura 1.

La contribución del presente artículo se puede resumir en tres elementos fundamentales:

Se sugiere un procedimiento para estimar las curvas de sobrevivencia cuando la información histórica de las cargas aplicadas al pavimento es muy limitada.

Se combinan las curvas de desempeño y de sobrevivencia para estimar la vida remanente de un segmento de carretera.

Se utiliza la vida remanente y las condiciones estructurales del segmento de carretera para estimar el espesor de recubrimiento requerido para que funcione en condiciones óptimas por un período previamente establecido.

Este artículo esta organizado de la siguiente manera. La segunda sección presenta la estimación de los parámetros de la distribución Weibull. La tercera sección presenta el desarrollo de las funciones de sobrevivencia. La cuarta sección describe e ilustra el cálculo de la vida remanente y el espesor requerido para un segmento de carretera para que funcione apropiadamente para un intervalo de tiempo específico. La quinta sección presenta un ejemplo numérico para ilustrar paso a paso la aplicación de la metodología propuesta, además la sexta y última sección presenta conclusiones y recomendaciones.

ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS

La técnica de simulación Monte Carlo fué utilizada para estimar los parámetros de la distribución Weibull que caracterizan los diferentes escenarios climáticos identificados en Puerto Rico. La estrategia de simulación consiste en los siguientes pasos:

- Determinar el rango de las cargas de ejes sencillos equivalentes a 18,000 lbs requeridas para alcanzar el nivel terminal de servicio.
- Identificar los parámetros de la distribución Weibull asociados a cada región climática.

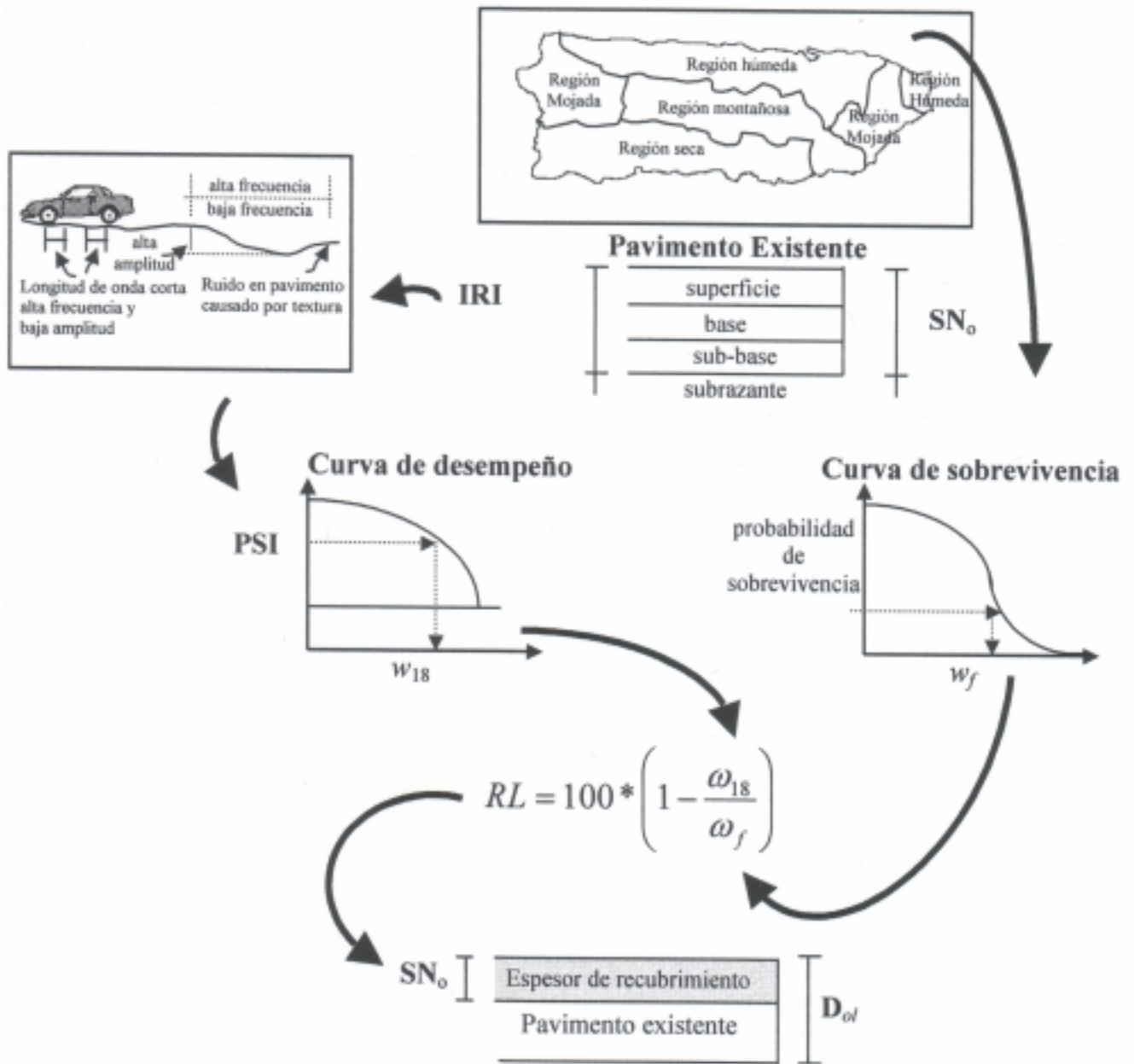


Figura 1: Descripción de la Metodología General.

DETERMINAR EL RANGO DE LAS CARGAS ACUMULADAS DE ESAL₁₈.

La técnica Delphi se utilizó para estimar las cargas acumuladas de tráfico, w_f , requeridas para que el pavimento alcance el nivel terminal de servicio en cada región climática. La técnica Delphi consiste en reunir a un grupo de expertos en el área de análisis y diseño de pavimentos para desarrollar unos estimados en base a su experiencia y conocimiento en la materia. El grupo de expertos estableció las siguientes suposiciones: el nivel inicial de servicio es de

4.0, las fallas en el pavimento son típicamente por fatiga y además consideró que el nivel de servicio terminal en el pavimento es de 1.5. Estas suposiciones corresponden al desempeño típico de un segmento de carretera del sistema primario de Puerto Rico. El panel de expertos estableció que los valores promedio de la carga acumulada requerida para alcanzar un nivel de servicio de 1.5 deben de fluctuar aproximadamente entre 6.5 y 15.4 millones de $ESAL_{18}$, los cuales están asociados a las regiones húmeda y seca, respectivamente. Después de un exhaustivo análisis el grupo de expertos propuso un rango de variación de las cargas acumuladas para cada región. El rango de variación está expresado en términos del valor esperado y la desviación estándar de la carga acumulada. Los rangos de variación para cada región se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1: Rangos de Variación Propuestos por los Expertos.

Carga acumulada en millones de $ESAL_{18}$	Región Climática			
	Montañosa	Húmeda	Mojada	Seca
Promedio	7	6.5	11.5	15.4
Desviación estándar	0.7	0.5	1	1.3

ESTIMACIÓN DE LAS PARÁMETROS DE LA DISTRIBUCIÓN WEIBULL

Una vez establecido el rango de variación para cada región, se utilizó la técnica de simulación para estimar los parámetros de la distribución Weibull. La distribución Weibull se caracteriza por los parámetros Alfa (α) y Gama (γ). Alfa es el parámetro de la escala y gama es el parámetro de la forma. Debido que el parámetro gama provee la posibilidad de cambiar la forma de la distribución se puede notar que la distribución Weibull es muy flexible, por consiguiente, se pueden modelar las fallas funcionales y estructurales de los pavimentos. El parámetro gama permite que la distribución Weibull se pueda comportar de diferentes formas. Por ejemplo, modulando el parámetro gama la distribución Weibull se puede aproximar a la distribución Exponencial, a la Normal y a la Chi-cuadrada, ayudando estas aproximaciones a representar de manera más apropiada las cargas requeridas para que un pavimento alcance el nivel terminal de servicio.

Además de que la distribución Weibull es un modelo robusto y flexible, el mismo se ha aplicado en muchas áreas de la ingeniería para modelar eventos de confiabilidad y sobrevivencia. Como ejemplos de aplicaciones podemos encontrar fallas por fatiga de materiales usados en la construcción de vehículos, aviones y barcos, pruebas aceleradas en productos farmacéuticos; usualmente estas pruebas permiten determinar la fecha de caducidad de los medicamentos (Kapur y Lamberson, 1977; Chow y Liu, 1995; Lawless, 1982). Estas son varias de las razones fundamentales por las que se seleccionó esta distribución para representar el comportamiento de las cargas acumuladas requeridas para lograr el nivel de servicio terminal. La carga acumulada w_f sigue una distribución de probabilidad Weibull si su densidad de probabilidad se puede expresar de la siguiente manera:

$$f(w_f) = \frac{\gamma}{\alpha} \left(\frac{w_f}{\alpha} \right)^{\gamma-1} e^{-\left(\frac{w_f}{\alpha} \right)^\gamma}, \quad w_f > 0, \quad \alpha > 0, \quad \text{y} \quad \gamma > 0 \quad (1)$$

donde α y γ son los parámetros de la distribución.

Se utilizó la técnica de simulación Monte Carlo para estimar los parámetros de la distribución Weibull. El procedimiento consiste en simular las cargas requeridas para alcanzar el nivel de servicio terminal. Los parámetros de la distribución se cambiaron sistemáticamente hasta conseguir que las cargas simuladas tuvieran el valor esperado y los rangos propuestos por el grupo de expertos. A cada muestra generada se le calculó la media y la desviación estándar los cuales se comparan con los valores propuestos por los expertos.

La expresión que se utilizó para generar los números aleatorios con distribución Weibull es:

$$w_f(i) = \alpha \left[-\ln(1-R_i) \right]^{1/\gamma}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

donde $w_f(i)$ es la carga acumulada para que el pavimento alcance el nivel de servicio terminal de 1.5.

Los parámetros de la distribución Weibull que se obtuvieron para las diferentes regiones climáticas se muestran en la

Tabla 2.

FUNCIÓN DE SOBREVIVENCIA

La función de sobrevivencia es un modelo matemático que estima la probabilidad de que una milla del pavimento sobreviva operando apropiadamente para el tráfico y la carga para la cual fué diseñada. La carga acumulada es una variable aleatoria w_f por lo que se justifica utilizar un modelo probabilístico para describir el comportamiento de esta variable.

La función de probabilidad de la carga requerida para lograr el nivel de servicio terminal se describe por medio de la ecuación (1). Así que la probabilidad de que un segmento de carretera alcance el nivel de servicio terminal cuando la carga acumulada de transporte sea igual o menor que w_f esta dada por:

$$P(W \leq w_f) = F(w_f) = \int_0^{w_f} f(t)dt = 1 - e^{-\left(\frac{w_f}{\alpha}\right)^\gamma} \quad (3)$$

donde W es la carga acumulada requerida para lograr el nivel de servicio terminal y w_f es la realización de la variable aleatoria W . $f(t)$ es la función de probabilidad definida por la ecuación (1).

La probabilidad de que un segmento de carretera tenga un nivel de servicio superior al nivel terminal cuando se le ha aplicado una carga acumulada de w_f se le conoce como la función de sobrevivencia. Esta función se puede expresar de la siguiente manera:

$$P(W > w_f) = s(w_f) = \int_{w_f}^{\infty} f(t)dt = e^{-\left(\frac{w_f}{\alpha}\right)^\gamma} \quad (4)$$

La función de sobrevivencia es un modelo que señala que el nivel de servicio terminal en un segmento de carretera puede ocurrir después de que ha resistido la carga acumulada w_f .

Se puede notar que la función de probabilidad $f(w_f)$ expresa el comportamiento estocástico de la carga acumulada $ESAL_{18}$ para un segmento de carretera que logra el nivel de servicio terminal. Así, la función acumulada de probabilidad $F(w_f)$ indica que la probabilidad de que un segmento de carretera alcance su nivel de servicio terminal cuando este recibe una carga acumulada de w_f o menos. Así que, la función acumulada de probabilidad define la función de falla, mientras que la función de sobrevivencia define la función de que el pavimento opere en un nivel de servicio superior al terminal cuando el pavimento ha recibido una carga acumulada de w_f .

Utilizando los parámetros asociados a cada región se contruyó la función de sobrevivencia que le corresponde a cada región climática. Estas curvas señalan en el eje horizontal la carga acumulada de transporte que se introduce al pavimento y en el eje vertical la probabilidad de que el pavimento se encuentre en un nivel de servicio superior al terminal. La Figura 2 muestra el comportamiento probabilístico de las cuatro regiones, presumiendo que las estimaciones del panel de expertos son correctas.

Tabla 2: Parámetros de la Distribución Weibull

Parámetro de la Distribución	Región Climática			
	Montañosa	Seca	Húmeda	Mojada
α	7.24	15.98	6.83	12.03
γ	11.70	14.52	16.27	13.04

PREDICCIÓN DE LA VIDA REMANENTE

De acuerdo a la AASHTO (1993) los métodos para diseñar pavimento flexible se pueden clasificar en dos grandes grupos: método empírico y método analítico. El primer método es una técnica que consiste en estimar el espesor

requerido por medio de comparación del espesor efectivo del pavimento contra el espesor estructural de diseño. El método analítico utiliza las propiedades de los materiales y un modelo numérico en el cual a base de tanteo se determina el espesor requerido.

En esta base del estudio adoptamos el método empírico, ya que nos permite usar las cargas de tránsito acumulado descritas previamente. El método mide la pérdida de espesor para pavimentos flexibles y su cálculo se obtiene mediante la aplicación de la siguiente fórmula (AASHTO, 1993):

$$D_{ol} = \frac{SN_f - (CF)SN_0}{a_{ol}} \quad (5)$$

donde D_{ol} representa el recubrimiento requerido, SN_f es el número estructural requerido para soportar la carga acumulada pronosticada, CF es el factor de condición del pavimento. La AASHTO (1993) ha desarrollado una relación entre factor de condición y la vida remanente del pavimento. a_{ol} es el coeficiente estructural del recubrimiento asfáltico. SN_0 es el número estructural inicial, este número estructural se define en términos de los números estructurales y de los espesores de las capas del pavimento.

$$SN_0 = \sum_{i=1}^4 a_i D_i m_i \quad (6)$$

donde a_i es el coeficiente estructural de la i -ésima capa, D_i es el espesor de la i -ésima capa, y m_i es el coeficiente de drenaje de la i -ésima capa granular (no aplica a las capas asfálticas). La vida remanente de un segmento de carretera se puede definir de la siguiente forma:

$$RL = 100 \left(1 - \frac{w_{18}}{w_f} \right) \quad (7)$$

donde w_{18} es la carga acumulada de tráfico a la fecha en que se realiza el análisis, w_f es la carga acumulada del $ESAL_{18}$ requerido cuando el nivel de servicio sea de 1.5.

Las carreteras que se ubican en una región climatológica en lo particular presentan un deterioro del pavimento que en promedio puede ser expresado por la función genérica de desempeño. Las funciones genéricas de desempeño del pavimento para cada región de Puerto Rico fueron desarrolladas por Colucci et al., (1997). Las curvas de desempeño se utilizan para estimar la carga acumulada hasta el tiempo de análisis, y este cálculo se obtiene utilizando la siguiente expresión:

$$w_{18} = \rho \left(\frac{P_0 - P}{P_0 - P_f} \right)^{1/\beta} \quad (8)$$

donde P_0 es el nivel inicial de servicio, P_f es el nivel de servicio terminal, ρ y β son parámetros obtenidos de la función genérica de desempeño del pavimento para una región climática específica, y P es el nivel de servicio en el momento de realizar el análisis, el cual puede ser estimado con mediciones de rugosidad tales como las obtenidas con el equipo ARAN (Automated Road Analyzer), o el DIPstick (Pérez 1994).

La carga acumulada w_f para lograr el nivel de servicio terminal P_f se puede estimar utilizando la función de sobrevivencia en la que se establezca una probabilidad de sobrevivencia. Debe notarse que se utiliza la función de sobrevivencia y no la función de desempeño por que esta última es determinística; así que, no considera el nivel de incertidumbre al cual están sujetas las carreteras. Una acción más realista es considerar la carga requerida para alcanzar el nivel de servicio terminal como variable aleatoria, w_f , mientras que la variable w_{18} es una variable determinística al momento del análisis.

La función de sobrevivencia se utiliza para calcular la carga acumulada para que el pavimento se mantenga en un nivel de servicio superior al nivel terminal dada la probabilidad de sobrevivencia, h .

$$w_f = \alpha (-\ln(h))^{1/\gamma} \quad (9)$$

donde $1-h$ es la probabilidad de que el segmento de carretera alcance el nivel de servicio terminal cuando el segmento de carretera esta sujeto a una carga acumulada de w_f .

Las funciones de desempeño y de sobrevivencia están esquemáticamente representadas en la Figura 1.

Esencialmente, esta figura describe la idea fundamental propuesta en este estudio para estimar la vida remanente de una carretera la cual se encuentra proporcionando servicio.

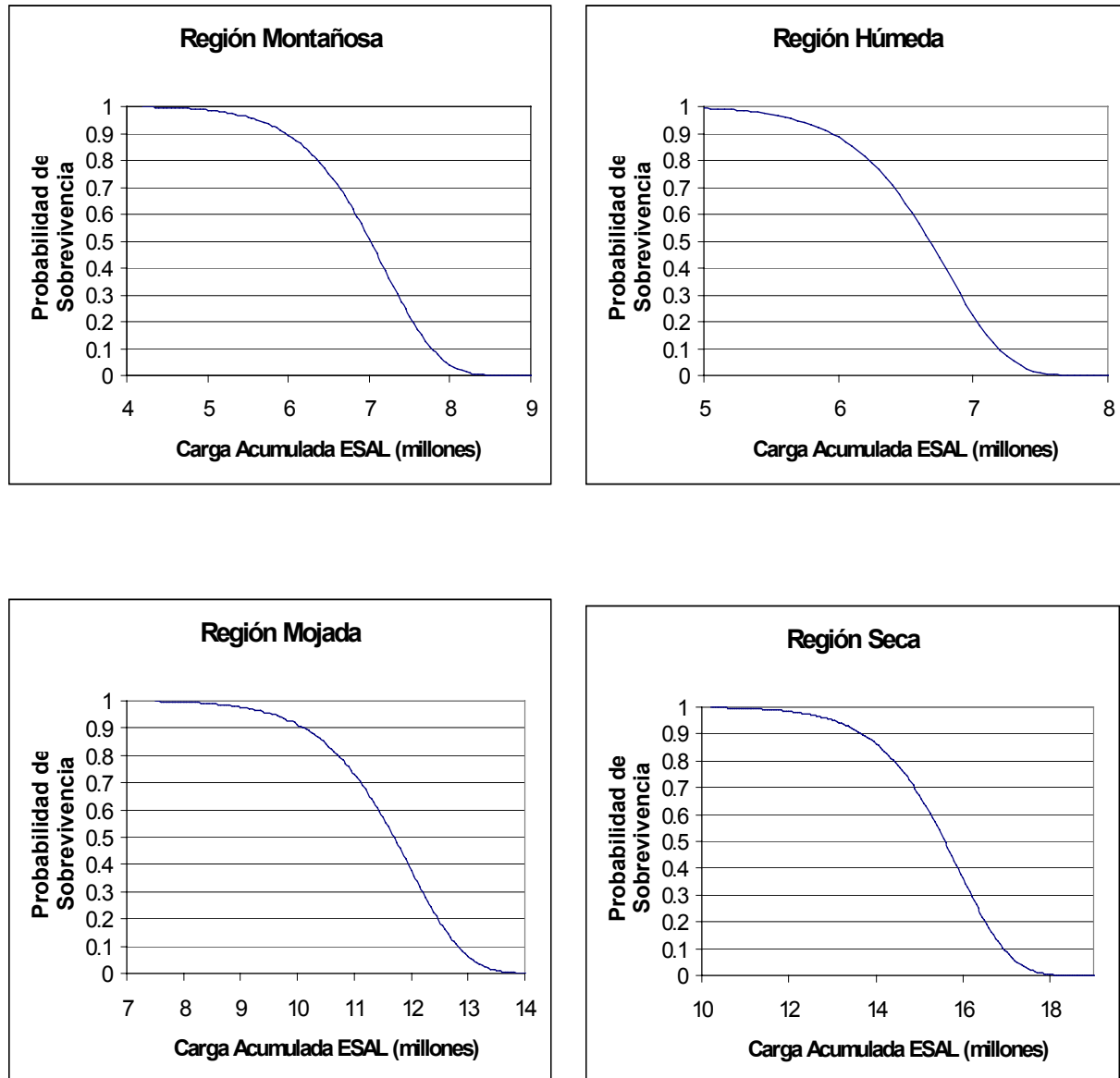


Figura 2: Curvas de Supervivencia

EJEMPLO NUMERICO

Con el propósito de ilustrar la metodología propuesta se ha diseñado un ejemplo numérico que describe paso a paso los cálculos para determinar el espesor de recubrimiento que necesita un segmento de carretera que se encuentra en operación. Arbitrariamente se seleccionó el segmento de carretera ubicado en la carretera PR-2 Km 84.4 en el Municipio de Hatillo, Puerto Rico. El segmento de carretera considerado está ubicado en la región húmeda.

Primer paso. Estimar el nivel de servicio del segmento de carretera.

El nivel de servicio de un segmento de carretera se puede determinar estudiando las condiciones del pavimento y principalmente el comportamiento de la rugosidad. El índice internacional de rugosidad (IRI) fue obtenido por medio del vehículo ARAN. Pérez (1994) comparó las medidas del ARAN contra las medidas del DIPstick para el mismo pavimento y durante el mismo período de tiempo. Pérez encontró que las medidas del ARAN deben corregirse para obtener información de rugosidad más cercana a las medidas del DIPstick, el cual es un instrumento más preciso que el ARAN. El ARAN proporciona información más rápida y abundante que el DIPstick sin embargo, hay que aplicarle el factor de corrección. La relación de las medidas del ARAN y del DIPstick para el caso de Puerto Rico es de carácter lineal y se puede expresar de la siguiente forma:

$$IRI_d = 1.22IRI_a$$

donde IRI_d y IRI_a son las medidas de rugosidad obtenidas por el DIPstick y por el ARAN, respectivamente. Las unidades de rugosidad se cambian de pulgadas por milla a milímetros por metro mediante el uso del factor correspondiente (63.3333).

Las lecturas del ARAN del segmento considerado fueron obtenidas en el año 1996 y nos proporcionó la siguiente medida de rugosidad, $IRI_a=178.55$ in/mi. Se aplica el factor de corrección y la conversión de unidades para obtener el siguiente resultado:

$$IRI_d = \frac{1.22(178.55)}{63.3333} = 3.44 \text{ mm/m}$$

La ecuación desarrollada por el Banco Mundial y documentada por Colucci et al., (1997) se puede utilizar para estimar el nivel de servicio del segmento en consideración mediante la siguiente operación:

$$PSI = 5e^{-\left(\frac{3.44}{5.5}\right)} = 2.68$$

Se puede notar que el segmento de carretera que no haya alcanzado su nivel de servicio terminal de 1.5 todavía se considera que tiene una vida remanente.

Segundo paso. Estimar la carga acumulada al momento del análisis.

Se calcula la carga acumulada al momento del análisis. Para lograr este cálculo se utiliza la relación empírica desarrollada para esa región por Colucci et al., (1997).

$$w_{18} = 6,332,400 \left(\frac{4.39 - 2.68}{4.39 - 1.5} \right)^{1/1.66} = 4,616,131 \text{ ESAL}_{18}$$

Tercer paso. Calcular la carga acumulada para conseguir el nivel terminal.

Suponiendo que el pavimento alcanza el nivel de servicio de 1.5 el 95% de las veces cuando la carga acumulada es de w_f , donde la carga acumulada esta dada en millones de $ESAL_{18}$. Suponiendo además que la carga acumulada para alcanzar el nivel de servicio de 1.5 sigue una distribución Weibull. Así que la carga acumulada para conseguir el nivel terminal para la región húmeda se obtiene de la siguiente manera:

$$w_f = 6.83(-\ln(0.05))^{1/16.27} = 7.31 \text{ millones de } ESAL_{18}$$

Cuarto paso. Determinar la vida remanente.

De acuerdo a la recomendación de la AASHTO (1993) el porcentaje de la vida remanente para este segmento de carretera se puede calcular de la siguiente manera:

$$RL = 100 \left(1 - \frac{4.616}{7.31} \right) = 36.85\%$$

Quinto paso. Estimar el factor de condición.

El factor de condición está relacionado al porcentaje de la vida remanente y esta relación fué desarrollada empíricamente por AASHTO (1993). Se desarrolló una relación no lineal entre la vida remanente y el factor de condición del pavimento. El factor de condición (CF) correspondiente a un pavimento flexible con una vida remanente de 36.85% es de 0.84.

Sexto paso. Cálculo del espesor de recubrimiento requerido.

Observando el segmento bajo consideración encontramos los siguientes espesores asumiendo un coeficiente unitario de drenaje (m_i) para las cargas granulares: el espesor de la primera capa es de $D_1=3.5''$ y esta constituido por una mezcla de asfalto de graduación densa denominada S-1. El espesor de la segunda capa es de $D_2=5''$ y contiene una base asfáltica B-1. El espesor de la piedra de base es de $D_3=7.5''$, y el espesor de la sub-base es de $D_4=10''$ y está compuesta

de material granular A-2-4 o mejor. Los coeficientes estructurales fueron obtenidos usando la guía de diseño de pavimentos (AASHTO, 1993) y son los siguientes: $a_1=0.44$, $a_2=0.40$, $a_3=0.18$, y $a_4=0.10$. Por lo tanto, el número estructural inicial se puede obtener de la siguiente manera:

$$SN_0 = (3.5)(0.44) + 5(0.4) + (7.5)(0.18) + (10)(0.1) = 5.89$$

En nuestra opinión en la red de carreteras primarias de Puerto Rico la mayoría de la fallas ocurren por que las cargas de transporte exceden los parámetros de diseño y además por un drenaje inadecuado. Basándose en las consideraciones anteriores, el número estructural (SN) requerido para anticiparse a las cargas de transporte excesivas y al drenaje inadecuado se estima que debe ser un mínimo 6.0. Así que el espesor del recubrimiento requerido se calcula de la siguiente forma:

$$D_{ol} = \left(\frac{6 - (5.89)(0.84)}{0.44} \right) = 2.39''$$

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se utilizó la técnica Delphi para estimar el rango de variación de las cargas acumuladas en cada una de las regiones climatológicas para alcanzar el nivel de servicio terminal. La técnica Delphi se apoya en la participación de un panel de expertos en las áreas de evaluación y administración de pavimentos, así como en el área de análisis y diseño de pavimentos nuevos y rehabilitados.

Se utilizó la técnica de simulación para determinar los parámetros de la distribución Weibull que generan cargas terminales dentro del rango de variación establecido por el panel de expertos. La estrategia de simulación permitió encontrar parámetros de la distribución Weibull para las cuatro regiones climáticas de Puerto Rico.

La distribución Weibull se ha utilizado para representar el comportamiento probabilístico de las cargas de tránsito acumuladas. Esta distribución nos ha permitido desarrollar funciones de sobrevivencia para cada una de las regiones climáticas de la isla. La función de sobrevivencia permite la posibilidad de estimar las cargas de transporte acumuladas para que la carretera provea un servicio superior al nivel terminal. La curva genérica del desempeño de las carreteras asociadas a una región climática proporciona la oportunidad de estimar la carga de transporte acumulada hasta el tiempo en que se realiza el análisis. Las cargas acumuladas se combinan para estimar la vida remanente de un segmento de carretera. Una vez determinada la vida remanente se obtiene el factor de condición y finalmente se determina el espesor requerido.

La metodología propuesta está limitada a que los parámetros de la distribución Weibull dependen de la apreciación subjetiva que tienen los panelistas sobre el desempeño de los pavimentos. Sin embargo, esa apreciación subjetiva se mejora en la medida que se disponga de información histórica. A medida que se obtenga información histórica del desempeño de las carreteras se van actualizando los parámetros de la distribución Weibull y, por consiguiente, las estimaciones de los espesores será más precisa. Por ejemplo, en nuestro caso las curvas de desempeño para cada región climática se desarrolló basándose en información histórica. Sin embargo, esta información es insuficiente para desarrollar las curvas de sobrevivencia. Esta curva genérica de desempeño nos ayudó a corroborar y en ciertos casos hasta modificar la apreciación inicial de los panelistas. La técnica propuesta en ausencia de datos históricos es útil para desarrollar una metodología que nos estima la vida remanente de un segmento de carretera y, por ende, determinar el espesor requerido de acuerdo a las condiciones de la carretera en servicio.

Tenemos la confianza de que la metodología desarrollada proporciona una herramienta útil para apoyar a los ingenieros diseñadores de la Autoridad de Carreteras y Transportación de Puerto Rico en el proceso de estimar en forma más precisa el desempeño de un pavimento flexible en una región y el correspondiente diseño de recubrimiento.

RECONOCIMIENTOS

Este trabajo fué desarrollado en la Universidad de Puerto Rico, en el Recinto Universitario de Mayagüez. Los autores expresan un sincero reconocimiento a la Fundacional Nacional de Ciencia y al Centro de Investigación en Infraestructura Civil por habernos proporcionado el apoyo necesario para desarrollar este esfuerzo de investigación.

Este artículo técnico refleja las opiniones de los autores y no necesariamente representa la política oficial de la Autoridad de Carreteras y Transportación de Puerto Rico.

REFERENCIAS

AASHTO Guide for Design of Pavement Structures. (1993). *American Association of State Highway and Transportation Officials*, Washington, D.C..

- Colucci, R. B., Ramírez-Beltrán, N. D. y Dosal, F. (1997). "A Methodology for Developing Generic Performance Curves for Flexible Pavements in Puerto Rico Using Clustering Techniques," *Transportation Research Board*, No 1592, Pavement Management and Performance, pp. 116-124.
- Chow, S. y Liu, J., (1995). *Statistical Design and Analysis in Pharmaceutical Science*, Marcel Dekker, New York.
- Fwa, T. F. y Sinha, K.C. (1991). "Pavement Performance and Life-Cycle Cost Analysis." *Journal of Transportation Engineering*, Vol. 117 (1), pp. 33-46.
- Kapur, K.C. y Lamberson, L. R. (1997). *Reliability in Engineering Design*, John Wiley, New York.
- Lapin, L. L. (1990). *Probability and Statistics for Modern Engineering*, Second Ed., PWS-KENT, Boston.
- Lawless, J. F. (1982). *Statistical Models and Methods for Lifetime Data*, John Wiley, New York.
- Pérez, B.J. L. (1994). *Análisis de Datos de Rugosidad de Modelos para Estimar la Tendencia del Deterioro de Pavimentos*, Tesis de Maestría, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Puerto Rico, Mayagüez, Puerto Rico.
- Shahin, M.Y. (2000). *Pavement Management for Airport, Roads, and Parking Lots*, Kluwer, Massachusetts.