

Desarrollo de un plan de inversiones para la priorización de rutas que presentan un bajo coeficiente de rozamiento



Ing. Jenny Chaverri Jiménez, MScEng

Coordinadora de auditoría técnica en infraestructura vial - LanammeUCR
Profesora Escuela de Ingeniería Civil - Universidad de Costa Rica
Teléfono: (506) 2511-4996 / Fax: (506) 2511-4442
E-mail: jenny.chaverri@ucr.ac.cr

Ing. Wendy Sequeira Rojas, MSc

Auditora de Seguridad Vial
Programa de auditoría técnica en infraestructura vial – LanammeUCR
Teléfono: (506) 2511-4996 / Fax: (506) 2511-4442
E-mail: wendy.sequeira@ucr.ac.cr

Luis Carlos Zamora Bustamante

Asistente de Auditoría Técnica
Teléfono: (506) 2511-4996 / Fax: (506) 2511-4442
E-mail: luiscarloszb@yahoo.com

José David Rodríguez

Asistente de Auditoría Técnica
Teléfono: (506) 2511-4996 / Fax: (506) 2511-4442
E-mail: josedavidrm@gmail.com

Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales
Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio,
Código Postal: 11501-2060
San Pedro de Montes de Oca, San José, Costa Rica

Resumen

Tomar decisiones eficientemente en la administración de la red vial requiere de parte de las autoridades en carreteras que entre otros, tengan suficiente conocimiento de la superficie y de la condición estructural de las carreteras en un momento particular. Información en la serviciabilidad del pavimento, capacidad estructural, condición de la superficie y seguridad vial debe ser evaluada dentro de adecuados modelos de desempeño de pavimentos y análisis económicos.

Dentro del área de la seguridad vial, un aspecto importante a considerar es el nivel de rozamiento que experimenta el neumático del vehículo con la carretera. A mayor nivel de rozamiento, mayor es la fuerza que trata de oponerse al deslizamiento del vehículo. Mantener un valor mínimo de rozamiento de la superficie es vital para conservar las

condiciones de servicio y seguridad normales de una vía. Varios países cuentan con estudios que relacionan los bajos niveles de rozamiento de un tramo vial con índices más elevados de ocurrencia de accidentes; lo cual indica que se deben mejorar los niveles de rozamiento para reducir la cantidad de accidentes y los gastos asociados con estos.

El objetivo de este trabajo consistió en una evaluación de las condiciones de fricción de diversas rutas de la Red Vial Nacional de Costa Rica. Mediante el análisis de su relación con la tasa de accidentalidad, se identificaron las secciones de las carreteras con alto riesgo debido a una inadecuada resistencia al deslizamiento o con un alto potencial de accidentalidad en clima húmedo. Se creó un plan decenal a nivel estratégico que permita priorizar las intervenciones para las diversas rutas que presentan alta vulnerabilidad en relación con la resistencia al deslizamiento.

Introducción

Un alto porcentaje de la red vial de la mayoría de los países centroamericanos obedece a estándares de diseño y operación distintos a los vigentes hoy en día, que fueron concebidas para condiciones de tráfico mucho menos exigentes, de ahí la importancia de invertir en la mejora continua de las condiciones de seguridad vial de estas vías, para que con un espíritu proactivo se busque prevenir la severidad y frecuencia de los accidentes en las carreteras existentes e incorporar los conceptos de seguridad vial al diseño de las vías nuevas.

Uno de los aspectos que se considera de suma importancia en la seguridad vial es la fricción que experimenta el neumático con la carretera. La fricción es definida como la resistencia al movimiento entre dos superficies que están en contacto. La magnitud de la fricción es medida mediante el coeficiente de fricción, el cual se define como el cociente entre las fuerzas de fricción, que son la paralela a la superficie de contacto entre dos cuerpos y opuesta a su movimiento, y la fuerza normal, la cual es perpendicular a la superficie de contacto. En el contexto del tráfico de carreteras, la superficie de contacto es la superficie de ruedo – interface del neumático, y la fuerza normal es la carga del neumático.

El deslizamiento ocurre cuando la componente tangencial de la fuerza que actúa en la superficie de contacto entre el neumático y el pavimento excede la máxima fricción disponible, haciendo que la estabilidad direccional del vehículo se pierda. Accidentes por deslizamiento usualmente ocurren sobre pavimentos mojados, esto debido a que hay una

reducción en la fricción causada por el efecto lubricante de la capa de agua presente en la interface neumático-pavimento.

El término resistencia al deslizamiento es generalmente usado para describir la contribución del pavimento al desarrollo de la fricción y está involucrado directamente con la seguridad vial. Se define como la capacidad de tolerar las fuerzas de fricción entre neumático y pavimento a causa de las sollicitaciones generadas durante el proceso de conducción, que involucra aceleración, frenado y viraje. Esta interacción entre el neumático y pavimento puede variar según sean las condiciones de la interface entre ambos, por ejemplo seca, húmeda, mojada o presencia de cualquier contaminante (caucho, polvo, grasa, etc.). En un pavimento seco, la resistencia del deslizamiento es suficiente para contraatacar la demanda de fricción en la mayoría de las situaciones. Sin embargo, en un pavimento húmedo o mojado, la resistencia al deslizamiento se reduce considerablemente y dependiendo de las condiciones del pavimento, puede ser insuficiente en algunas situaciones. Consecuentemente, procedimiento de ensayo y previos estudios sobre la seguridad relacionados con la resistencia al deslizamiento han estado enfocados en las condiciones de los pavimentos mojados.

La resistencia al deslizamiento cambia con el tiempo. Típicamente incrementa en los primeros dos años posteriores a la construcción cuando el ligante asfáltico que cubre los agregados se va desgastando como consecuencia del tránsito, luego decrece durante la vida útil remanente del pavimento debido a que el agregado se va puliendo.

La resistencia al deslizamiento es un valor obtenido en sitio mediante algún instrumento, como por ejemplo el Griptester, que indica un coeficiente adimensional representativo de las fuerzas de fricción que moviliza el neumático que emplea el equipo.

Antecedentes

- **Fricción y Accidentalidad**

La relación entre fricción y seguridad de la carretera ha sido objeto de múltiples estudios. En general, estos estudios están basados en datos de una red vial específica, pero ya que la naturaleza del problema es común, los resultados se han estado usando como una referencia internacional. Para este propósito, la mayoría de los resultados de las

investigaciones publicadas hacen referencia a las dos medidas de resistencia al deslizamiento más conocidas: SN¹, SCRIM² y el GN³.

Numerosos estudios en países europeos como Holanda, Alemania y Francia ¹ examinaron datos de colisiones y resistencia al deslizamiento y mostraron que el número de colisiones en sitios propensos a deslizamientos se incrementa estrepitosamente cuando el coeficiente de fricción disminuye. Por ejemplo, cuando el coeficiente de fricción es 0.35 a 0.44, la tasa de colisiones es 0.20 (lesiones personales/millón veh-km). Cuando el nivel de fricción es menor que <0.15, la tasa de colisiones aumenta 300%. Los estudios revelan que no existen guías específicas cuando se habla de un nivel aceptable de fricción. Sin embargo, se concluye que los pavimentos con un número de deslizamiento (SN) menor a 35 puede ser potencialmente problemático desde un punto de vista de seguridad.

Halim, Tighe y otros (2009)² evaluaron una estructura simplificada de niveles de seguridad en carreteras en términos del riesgo de colisión basado en la fricción de la superficie del pavimento. El estudio concluyó que la fricción tiene un efecto en la seguridad vial y en la probabilidad de ocurrencia de los accidentes. Adicionalmente, la geometría de la carretera afecta al conductor, al vehículo y la seguridad vial.

Lindermann (2004)³, usando datos de la red de carreteras nacionales completa de Suiza, evaluó cerca de 6000 km de carreteras con el SCRIM. Intentos por correlacionar los datos de fricción con los datos de accidentes durante 5 años resultaron sin éxito.

Kuttesch (2004)⁴ usó datos de accidentes y resistencia al deslizamiento del programa de accidentes en pavimentos mojados en Virginia así como datos de secciones sin pre-identificar accidentes o sin problemas de deslizamiento. Él encontró un efecto estadísticamente significativo de la resistencia al deslizamiento en la tasa de accidentes en pavimentos mojados, indicando que la tasa de accidentes producidos en pavimentos mojados incrementa cuando el número de deslizamiento (skid number) decrece. Él concluyó que el número de deslizamiento SN₆₄ de 25-30 puede ser justificado en general y que un

¹ Skid Number: El valor de fricción SN es medido de acuerdo con el método ASTM E247, el cual describe la medición de la fricción usando una rueda bloqueada, lisa o de hule. El valor de fricción es el coeficiente de fricción medido multiplicado por 100. Este valor se designa SN *velocidad del ensayo R* para llantas de hule (ASTM E501) y SN *velocidad del ensayo S* para llantas lisas (ASTM E524).

² Sideway-Force Coefficient Routine Investigation Machine: Máquina de Investigación Rutinaria del Coeficiente de Fuerza Lateral.

³ Grip Number: Coeficiente de rozamiento longitudinal medido con el Griptester

número de 40 puede tener un efecto positivo en reducir la tasa de accidentes en pavimentos mojados en carreteras inter-estatales.

Meegoda y Gao⁵ mostraron que cuando los pavimentos están mojados, la tasa de colisiones ocurre de 3.9 a 4.5 veces más que cuando el pavimento está seco. La resistencia al deslizamiento sola no puede predecir la tasa de accidentes ya que hay otros factores que contribuyen a los accidentes, incluyendo las condiciones del pavimento, la velocidad imperante y el volumen de tránsito. Sin embargo, existe una correlación estadísticamente significativa entre la resistencia al deslizamiento y los accidentes ocurridos sobre pavimentos mojados, en donde éstos aumentan con el decrecimiento del número de deslizamiento (skid number).

Murad y Abaza⁶ (2005) propusieron un programa destinado a reducir los accidentes en clima húmedo tomando en consideración la fricción del pavimento. Establecieron un sistema de rangos según la prioridad basado en un análisis estadístico (análisis beneficio/costo) que permita distribuir los fondos disponibles razonablemente a las áreas seleccionadas. El estudio propuso un programa que permita identificar y revisar las secciones de las carreteras estatales con alto riesgo debido a una inadecuada resistencia al deslizamiento o con un alto potencial de accidentalidad en clima húmedo. El programa provee una herramienta de decisión para evaluar la eficiencia de las actividades de rehabilitación, lo cual ayudará también a distribuir el presupuesto limitado a las diferentes actividades mediante un sistema de rango prioritario.

- **Plan de Inversiones**

Un plan de inversiones se debe enmarcar dentro de un Sistema de Administración de Carreteras. Un Sistema de Administración de Carreteras es un procedimiento organizado que provee a los tomadores de decisiones, en todos los niveles de la administración, de estrategias óptimas derivadas de un proceso racional; coordinando todo el conjunto de actividades relacionadas con planificación, diseño, construcción, mantenimiento, evaluación, e investigación en pavimentos⁷.

Un Sistema de Administración de Carreteras se puede dividir en tres niveles: estratégico, táctico y operacional. El nivel estratégico toma las metas y objetivos generados a un nivel ejecutivo de la organización y los incorpora en la elaboración del plan de inversiones de largo plazo, el cual, se ejecuta con un horizonte mínimo de 10 años. Es indispensable

ejecutar análisis en el largo plazo, debido a que de esta manera se podrá analizar el impacto de las decisiones que se toman en el presente en la red de carreteras.

El siguiente nivel es el táctico, el cual toma los primeros cuatro o cinco años del plan estratégico y analiza a un nivel más detallado las prioridades de intervención generadas por el nivel estratégico y que además incorpora otros aspectos adicionales para la priorización de esas rutas comprendidas en el quinquenio. Finalmente, el nivel operacional es aquel donde se analizan los dos primeros años de intervención a nivel de proyecto, elaborando así los diseños de las rutas a intervenir, análisis económicos, presupuestos y procesos licitatorios.

El nivel estratégico utiliza un nivel de información más general (nivel de red) que la requerida a nivel táctico y a nivel operacional (nivel de proyecto). Adicionalmente, debe realizarse un monitoreo anual de la red y una evaluación de los trabajos ejecutados en el pavimento para determinar sus nuevos índices de condición de pavimentos (PCI); de esta forma se actualiza la base de datos y se pueden actualizar los planes estratégicos a largo plazo y sucesivamente el táctico y operacional.

En el año 2002, el Departamento de Transportes de la provincia de New Brunswick en Canadá (NBDOT) desarrolló una metodología para la implementación del Sistema de Administración de Carreteras en esa provincia. Esto fue realizado en asociación con Xwave Inc, la Universidad de New Brunswick (UNB) y Remsoft Inc, Como resultado de este trabajo, se generó un índice de condición de pavimentos (PCI) basado en deterioros superficiales, índice de regularidad superficial (IRI) y deflectometría proveniente del deflectómetro de impacto (FWD).

En la actualidad, el Departamento de Transportes de New Brusnwick (NBDOT), ha implementado en su gestión de pavimentos su indicador PCI basado únicamente en el IRI y en deterioros superficiales. Mediante el programa de optimización lineal Woodstock de Remsoft Inc. desarrolla sus planes de inversiones de largo plazo, incorporando activos de pavimentos y puentes. El resultado de estos planes de inversión fue que se triplicó el presupuesto anual para sus carreteras.

Mrawira et al (2007)⁸ realizó para Costa Rica curvas de deterioro a partir de un PCI basado en el índice de regularidad internacional (IRI) y en deflectometría (FWD), además analiza estrategias de inversión.

Metodología y Alcances

La red vial pavimentada de Costa Rica cuenta con aproximadamente 4,000 km. La Universidad de Costa Rica a través del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR) efectúa una evaluación bienal del estado de toda la red vial mediante la medición de diversos parámetros técnicos tales como las deflexiones superficiales obtenidas con el deflectómetro de impacto (FWD), las irregularidades superficiales de las vías (IRI) utilizando el perfilómetro láser, y el coeficiente de rozamiento existente entre el pavimento y las llantas mediante el uso del equipo de fricción (Griptester)⁹. De la evaluación del 2008, se recopilaron estos parámetros técnicos para utilizarlos como insumo para el estudio según se puede observar en el esquema metodológico (Ver Figura N°1).

La metodología se desarrolló en dos etapas. La primera etapa consistió en la selección de las rutas que se incluirían dentro del plan de inversiones. Para ello, se implementaron varios criterios de selección. Como primer criterio de selección se realizaron tramos homogéneos utilizando los coeficientes de rozamiento medidos con el Griptester. Los tramos homogéneos se realizan con el fin de agrupar secciones de carretera con condiciones similares de fricción. Esto permite seleccionar los tramos homogéneos con condiciones malas (Grip Number GN<0.4) los cuales son considerados en este estudio como los prioritarios a intervenir ya que son los que pueden producir más problemas desde el punto de vista de la seguridad vial.

La segmentación se hizo a través del programa SPEC¹⁰. Cuando los datos son analizados por el SPEC, se obtiene como resultado gráficos que muestran los tramos homogéneos con sus respectivos promedios y desviaciones estándar. Adicionalmente, los elementos del diseño geométrico tales como rectas, curvas, intersecciones y pendientes, tienen influencia sobre la resistencia al deslizamiento que tiene el pavimento, por lo que también fueron incorporados dentro del análisis. Después de la primera segmentación, se realizaron subtramos considerando las condiciones geométricas de la vía.

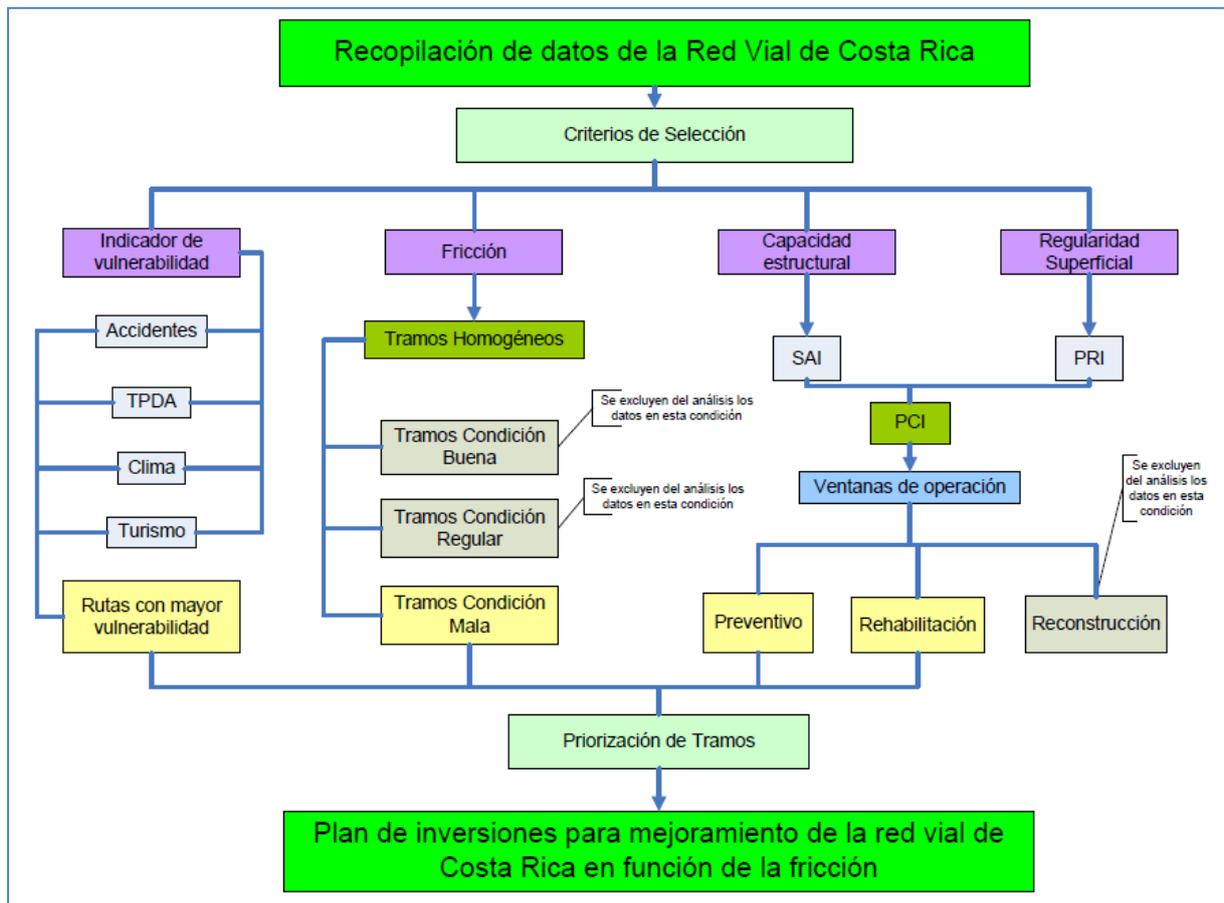


Figura N° 1: Esquema metodológico del estudio

Posteriormente, a los resultados de la segmentación se les da un formato determinado para poder ser utilizados en el programa ArcView¹¹. Este programa es una herramienta útil para manejar Sistemas de Información Geográfica (SIG) y en este caso se utilizó para generar mapas que permitan una mejor visualización de los tramos homogéneos y por ende, del estado de la red vial en lo referente a resistencia al deslizamiento.

Dentro de la primera etapa, se utilizó un segundo criterio para la selección de rutas. Una vez obtenidos los tramos homogéneos asociados a los coeficientes de rozamiento bajo, se procedió a evaluar diversas variables para seleccionar cuales rutas eran las más vulnerables a presentar deficiencias en su resistencia al deslizamiento. Para ello se consideró que tanto la accidentalidad, el tránsito promedio diario anual (TPDA), el clima, así como el turismo son factores que permiten identificar el grado de vulnerabilidad de los tramos y así tomar decisiones más precisas sobre cuales rutas se deben incluir dentro del plan de inversiones.

El TPDA se incorporó para realizar una clasificación de las secciones de acuerdo con la importancia de la vía en términos de la afluencia de vehículos. Se definió un indicador I_{TPDA} el cual da un puntaje entre 0 y 100 al tramo homogéneo dependiendo del rango de TPDA en el que se encuentre. Los rangos de TPDA se definieron a partir de los datos del informe de evaluación de la red vial nacional 2008. Por ejemplo, una sección con un TPDA de 10,000 se consideró que tiene un TPDA medio y se le asignó un valor de 50.

La accidentalidad permite conocer cuales rutas presentan mayor grado de riesgo ante los usuarios de la vía. Para poder cuantificar este parámetro se utilizaron dos indicadores: el índice de accidentalidad ($I_{A/P}$) y el índice de accidentalidad con respecto al kilometraje de viaje ($I_{A/P}$). Estos indicadores relacionan los saldos de muertos y heridos, proporcionalmente con la población, con el kilometraje recorrido.¹²

Adicionalmente, el clima juega un papel importante dentro de la evaluación de la resistencia al deslizamiento. Como se ha demostrado en numerosos estudios; la fricción entre el neumático y el pavimento disminuye cuando la superficie de rodamiento se encuentra mojada, por lo que lugares lluviosos pueden ser más propensos a presentar problemas de deslizamiento comparados con lugares más secos. Para incorporar el clima, se obtuvieron datos sobre días de lluvia al año, la precipitación promedio anual y la temperatura promedio de cada región¹³. Estos factores se ponderaron para así obtener un indicador general de clima, el cual se identificó como I_{Clima} y se le asignó un puntaje de 0 a 100.

Finalmente, se estimó que el turismo también es relevante dentro de la priorización, ya que existen rutas que independientemente de la afluencia de vehículos, se convierten en rutas frecuentes de turistas nacionales y extranjeros y deben mantenerse en condiciones óptimas dado la importancia que tiene el turismo para Costa Rica. Adicionalmente, las rutas turísticas presentan picos de afluencia en ciertas épocas del año y por lo general, muchos de los usuarios que las transitan desconocen los riesgos que pueden presentarse en las mismas. Con base en ello, se identificaron las rutas consideradas turísticas y se les dio un valor adicional dentro de la calificación general por medio del indicador $I_{Turismo}$.

Los indicadores de cada parámetro (accidentalidad, TPDA, clima y turismo) se correlacionaron mediante la ecuación 1 para estimar un “índice de vulnerabilidad”, el cual, de igual manera, brinda un puntaje de 0 a 100 a cada ruta, siendo 0 una ruta sin vulnerabilidad y 100 una ruta completamente vulnerable:

$$I_{vulnerabilidad} = k_1 \cdot I_{TPDA} + k_2 \cdot I_{Accidentalidad} + k_3 \cdot I_{Turismo} + k_4 \cdot I_{Clima} \leq 100 \quad (1)$$

Donde k_i corresponde a factores de peso relativo asociados a los indicadores de la vulnerabilidad total. Para la asignación de valores a los k_i se realizó un análisis de sensibilidad que permitió identificar cuales variables tenían más peso sobre el índice de vulnerabilidad. Finalmente, se seleccionaron aquellas rutas que presentaban los índices de vulnerabilidad más altos (Figura N° 3).

Posteriormente, como criterio final de selección, se consideró necesario contar con un indicador que reflejara la condición general del pavimento. El índice de Condición del Pavimento PCI (“Pavement Condition Index” por sus siglas en inglés) es uno de los indicadores utilizados para este fin. El PCI también se utilizó en la segunda etapa, que se detallará más adelante, para priorizar cuales tramos de carretera debe ser intervenidos y en qué orden.

Existen diversas combinaciones para la cuantificación del PCI, las cuales pueden contener información estructural, de regularidad superficial y de deterioros superficiales. Debido a la disponibilidad de información, para esta investigación la formulación del PCI se basó únicamente en las deflexiones (FWD) y la regularidad superficial (IRI). El índice de condición de pavimento propuesto es dado por:

$$PCI = k_A * SAI + k_B * PRI \quad (1)$$

Donde, SAI = índice de adecuación estructural derivada a partir de los datos del deflectómetro de impacto FWD, PRI = índice de regularidad superficial del pavimento derivado a partir del IRI, k_A y k_B son factores de peso relativo (seleccionados en este caso como $k_A = 0.5$ y $k_B = 0.5$). Se decidió asignar equitativamente un peso del 50% al índice de adecuación estructural y al índice de regularidad superficial. El índice de regularidad superficial del pavimento (PRI) se obtuvo a partir de los datos medidos de IRI. Los valores de PRI para cada sección del pavimento fueron calculados mediante una función normalizadora que traduce cada valor de IRI en una escala de 0 – 100 (Mrawira et al, 2007):

$$PRI = 100 \left(\frac{IRI_{max} - IRI_j}{IRI_{max} - IRI_{min}} \right) \quad (2)$$

Donde, PRI_j es el índice de regularidad superficial del pavimento de la j th sección, IRI_j es el valor medido de IRI para la j th sección (tramo homogéneo), IRI_{max} e IRI_{min} son los valores máximos y mínimos de IRI de todas las secciones en la red vial nacional de Costa Rica para los años 2004, 2006 y 2008 para un nivel de confianza del 98%.

El índice de adecuación estructural (SAI) provee una medida de la capacidad de carga o resistencia del pavimento. El SAI (ecuación 4) a utilizar fue desarrollado al tomar la resistencia del pavimento expresada por el parámetro base de deflexiones conocido como “AREA” (ecuación 3) normalizado por la deflexión en el centro de carga, D_0 (la cual se encuentra corregida por temperatura) y luego convertido en un índice escalado entre 0 – 100 por conveniencia para la formulación del PCI.

$$AREA = 150 * \left(\frac{D_0 + 2D_1 + 2D_2 + D_3}{D_0} \right) \quad (3)$$

Donde; D_0 , D_1 , D_2 , D_3 son deflexiones medidas desde el centro del plato de carga del deflectómetro de impacto (FWD) de las ordenadas a 0 mm, 300 mm, 600 mm y 900 mm respectivamente.

$$SAI = 100 \left(\frac{AREA_j - AREA_{min}}{AREA_{max} - AREA_{min}} \right) \quad (4)$$

Donde SAI_j es el índice de adecuación estructural para la j th sección (tramo homogéneo), AREA es definida como muestra la ecuación 3, $AREA_{max}$ y $AREA_{min}$ son los valores máximos y mínimos del AREA a nivel de toda la red vial nacional de Costa Rica. Para remover los efectos de valores anormales en los extremos, se aplicó un intervalo de confianza del 98%.

La escala de clasificación numérica de la condición del pavimento (PCI) se da en rangos de 0 a 100. Ésta consiste en cinco intervalos que van desde muy bueno hasta muy pobre tal y como se muestra en la Tabla 1, la cual indica también las ventanas de operación que aplican y sus costos. Para el plan de inversión se consideraron sólo aquellos tramos que presentaron valores de PCI mayores a 40 ya que valores inferiores indican que la condición del pavimento es pobre o muy pobre y no es económicamente viable mejorar la resistencia al deslizamiento de rutas que deben ser reconstruidas en el corto plazo.

Esta clasificación determina las ventanas de operación del pavimento (clasificado en rangos de PCI), es decir, para la condición determinada, corresponde un tratamiento o medida de conservación del pavimento determinado. Por ejemplo, un pavimento en estado muy bueno requerirá técnicas de preservación de pavimentos, mientras una condición pobre requerirá reconstrucción parcial (mejoramiento).

Tabla 1. Escala de clasificación del PCI con sus tratamientos y costos de intervención por kilómetro de carril de 3,65 metros

Clasificación	PCI ^(a)	Ventanas de Operación	Tratamiento ^(c)	Costo en dólares americanos (US\$/Km/carril)
Muy bueno	80-100	Preservación	Sobrecapa MAC ^(b) no estructural (5 cm)	20,000
Bueno	60-80	Rehabilitación menor	Sobrecapa MAC ^(b) estructural (6-12 cm)	28,000 – 55,000
Regular	40-60	Rehabilitación mayor	Sobrecapa MAC ^(b) estructural (12-18 cm)	55,000 – 82,000
Pobre	25-40	Reconstrucción parcial (Mejoramientos)	CA (13-19 cm)+ BE ^(b) 25 cm	98,000 – 126,000
Muy pobre	0-25	Reconstrucción total (Reemplazo de la estructura)	1) CA (14 cm) + BE ^(b) 25 cm + subbase 2) Tratamiento superficial	82,000 – 140,000

(a) NBDOT: "New Brunswick Department of Transportation" - Canadá

(b) MAC: Mezcla asfáltica en caliente, BE: base estabilizada con cemento.

(c) No se incluye el bacheo, ya que es una actividad que se aplica en áreas puntuales para mantenimiento de una vía en estado de regular a pobre. No se usan técnicas de preservación de pavimentos como las lechadas asfálticas, debido a que en el país no se aplican (año 2008).

Después de aplicar todos los criterios de selección (tramos homogéneos en condición de fricción mala, vulnerabilidad alta y PCI > 40) se obtuvieron los tramos a ser considerados en la segunda etapa. Esta segunda etapa se enfocó en la elaboración de un plan estratégico de inversiones que contempló el mejoramiento de la resistencia a la fricción de diversas rutas de la red vial de Costa Rica.

El plan de inversiones se realizó contemplando un escenario denominado "Presupuesto requerido" el cual permite estimar el presupuesto necesario para obtener un determinado nivel de servicio de la estructura de pavimento, en este caso, eliminar los pavimentos con bajos niveles de rozamiento en 10 años.

Resultados

Como se mencionó en el apartado anterior, la información disponible para el estudio consistió en datos de regularidad superficial mediante IRI linealmente referenciados, mediciones de deflexión FWD puntuales (con coordenadas) y coeficientes de fricción (medidos con el Griptester.). La medición realizada en el 2008 del coeficiente de fricción abarcó una longitud de 2,330 km de carreteras pavimentadas (50% del total de la red pavimentada); esto debido principalmente a la naturaleza del equipo (para mantener la

precisión del equipo, éste no puede ser utilizado en tramos que presenten un valor de IRI mayor de 4.0; de no mantener este cuidado, el equipo perdería su calibración rápidamente).

Con base en los criterios de selección, se procedió a generar tramos homogéneos de pavimentos con la información de fricción. Estos tramos homogéneos se clasificaron con base en el Grip Number (GN) de acuerdo con los criterios mostrados en la Tabla N° 1. Esta clasificación permitió diferenciar los tramos que se encuentran en condición deficiente de fricción y considerarlos posteriormente para el análisis de vulnerabilidad. En la Figura N° 2 se muestra un ejemplo de la segmentación de la Ruta Nacional N° 4 en donde los tramos en rojo corresponden a los tramos con un GN inferior a 0,4.

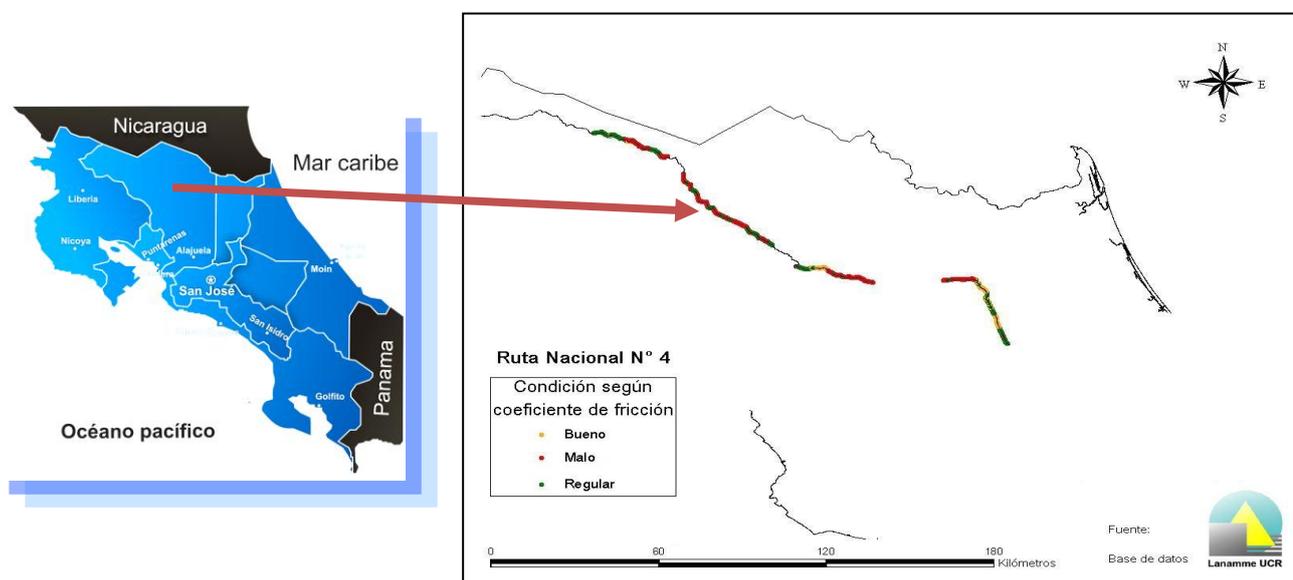


Figura N° 2. Tramos homogéneos de la Ruta N° 4 según condición de fricción

Para los tramos en condición mala, se evaluó su vulnerabilidad considerando el TDPDA, la accidentalidad, el clima y si la ruta es turística o no. El índice de vulnerabilidad también contempla unos factores de peso relativo (k_1 , k_2 , k_3 y k_4) cuyos valores fueron asignados mediante un análisis de sensibilidad. Para este análisis se consideraron 5 escenarios, cada uno con diferentes factores de peso relativo.

El escenario V se escogió por las siguientes razones:

1. Los datos de TDPDA y accidentes son de gran relevancia dentro del estudio, puesto que el objetivo es mejorar aquellas rutas con una afluencia significativa de vehículos y que a la vez estén asociadas a mayor accidentalidad debido a problemas de

fricción, por esto se consideró necesario darles un mayor peso dentro del indicador de vulnerabilidad.

2. Los datos de clima son muy generales, engloban regiones muy amplias, por lo cual no deben tener una alta participación dentro del indicador, ya que permite que los datos tiendan a equipararse, sin hacer la diferencia que se busca en el proceso de selección.
3. Los datos de turismo son extraídos del convenio entre el Ministerio de Obras Públicas y Transportes de Costa Rica (MOPT) y el Instituto Costarricense de Turismo, en el cual se establecen las rutas más turísticas del país, las cuales son importantes de considerar pero no en el mismo grado que el TPDA y la accidentalidad.

Tabla 1: Clasificación internacional del pavimento según el GN

GN	Condición	Nivel			Tipo de Pavimento característico
		Deslizamiento	Peligrosidad	Riesgo medio de accidentabilidad*	
< 0,50	Malo	Muy deslizante	Muy peligroso	mayor a 20	Pavimento flexible compuesto de agregado calizo
0,50 – 0,60	Regular	Deslizante	Peligroso	16 a 20	Pavimento flexible con alto grado de exudación y pérdida de textura
0,60 – 0,78	Bueno	Poco deslizante	Moderado	10 a 16	Pavimento rígido y flexible con buena textura
> 0,78	Muy Bueno	No deslizante	Seguro	menor a 10	Pavimento nuevo o sobrecapas

* Número de accidentes por cada millón de vehículos / kilómetro, en función del coeficiente de fricción, obtenidos en Gran Bretaña, según memorias del 5to Simposio de Características Superficiales de Pavimentos, Toronto, Canadá, 2004.

Una vez asignados los factores de peso, se procedió a calcular el índice de vulnerabilidad. Del análisis se escogieron las diez primeras rutas, las cuales reflejaban la vulnerabilidad más alta. En la Figura N°3 se pueden observar las rutas seleccionadas.

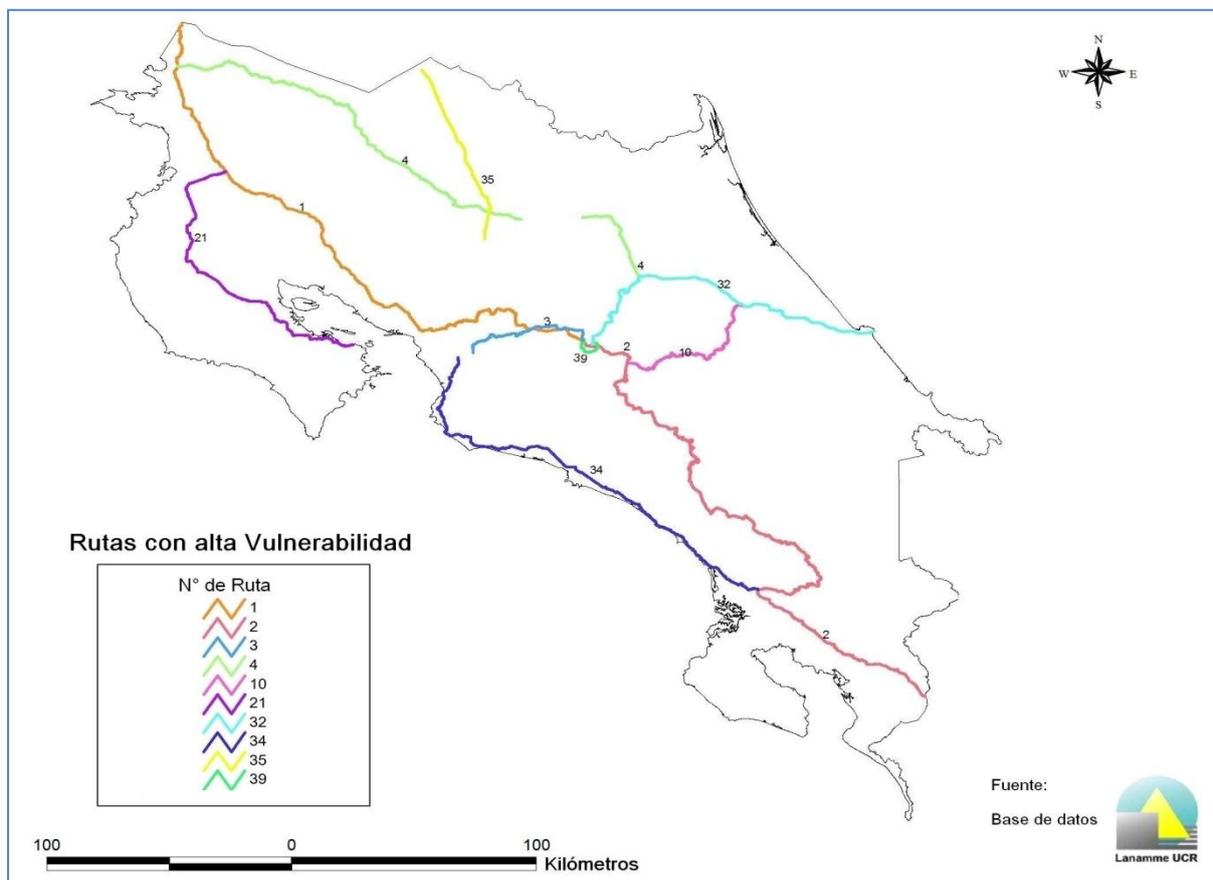


Figura N° 3. Rutas de Costa Rica con altos índices de vulnerabilidad

Seguidamente, el valor de PCI fue calculado para los tramos seleccionados con base en los datos recopilados de la evaluación de la red vial costarricense (deflectometría y regularidad superficial del año 2008). El índice IRI es determinado para tramos de 100 m. Sin embargo, existen secciones donde no se mide por el alto grado de deterioro de la superficie. Por otro lado, el ensayo de deflectometría se realiza en las rutas cada 400 m, distancia definida para un nivel de red por la Unidad de Evaluación de la Red Vial Nacional de LanammeUCR.

Para determinar el valor de PCI se superponen en un archivo *G/S* los tramos homogéneos de deflexiones, de IRI y el TPDA. Esta última variable se incluye debido a que en secciones largas de carreteras el TPDA puede variar mucho por lo que la demanda a la que se verán sometidos los pavimentos es muy diferente. De esta manera, las rutas son divididas en tramos de estudio donde a lo largo de éstos exista el mismo valor promedio de deflexiones, de IRI y tenga el mismo tipo de tránsito (bajo, medio o alto).

Una vez superpuestos las tres variables (deflexiones, IRI y TPDA), el procedimiento de definición de los tramos de estudio es visual, de acuerdo con los criterios citados previamente. Con los tramos definidos, se cuenta con los valores de IRI y deflexión para calcular el índice de Adecuación Estructural (SAI) y el índice de Regularidad de Pavimentos (PRI) y posteriormente el PCI. En la Figura N°4 se muestra la superposición de IRI, deflexiones y TPDA (izquierda) y los resultados finales de PCI (derecha).

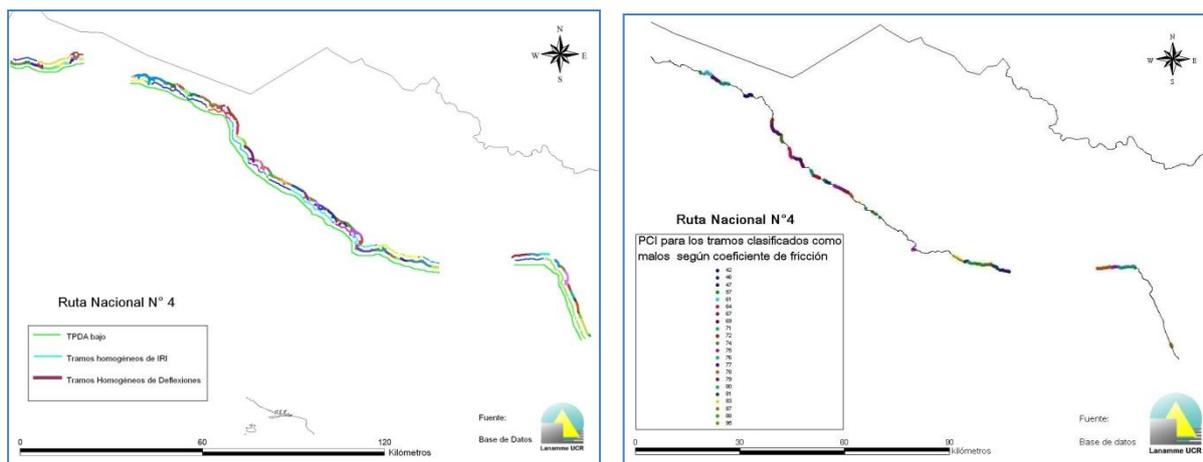


Figura N° 4. Resultados obtenidos del índice de Condición del pavimento (PCI) para la Ruta Nacional N°4 de Costa Rica.

Con el cálculo del PCI se finalizó con los criterios de selección de rutas y se procedió a la segunda etapa definida como la priorización de tramos a intervenir. A continuación se exponen los resultados de una ruta particular (Ruta Nacional N°4) a fin de mostrar el método de priorización utilizado.

La Ruta Nacional N° 4 analizada como caso de estudio para mejorar la condición del coeficiente de fricción, forma parte del denominado Corredor Noratlántico de Costa Rica. Este corredor vial tiene como fin facilitar el tránsito de carga que se traslada hacia los puertos de la costa Atlántica del país y hacia la frontera con Panamá a la altura del poblado de Sixaola, descongestionando así las vías del Valle Central, como se muestra en la Figura N° 5. La Ruta N° 4, junto con la Ruta N° 35, unirá las entradas terrestres de la frontera con Nicaragua con el futuro complejo portuario que se planea construir en el puerto de Limón. Esto hace que en un mediano plazo el tráfico por ambas vías se verá incrementado.



Fuente: www.zeenzn.com

Figura N° 5. Corredor Noratlántico de Costa Rica.

Además ya se han iniciado las gestiones para construir un tramo de carretera en la Ruta N° 4 (mostrado en amarillo en la figura anterior), que disminuiría el trayecto en aproximadamente 60 km con un trazado geométrico más regular y con menos pendientes.

El cambio en la variable de tránsito aunado a las condiciones climáticas de la zona hace necesario prestar especial atención a los problemas de fricción en los pavimentos de este corredor, por lo que la Ruta N° 4 constituye un buen ensayo de la metodología propuesta para priorización de inversiones en seguridad vial.

El caso de estudio de la Ruta Nacional N° 4, se tomaron los tramos con bajos coeficientes de rozamiento pero con valores de PCI mayores a 40, como se explicó previamente. Los tramos con PCI menores a 40 necesitan reconstrucciones parciales ó totales y por tanto no se considera efectivo mejorar esas rutas en términos de fricción si se van a intervenir en el corto plazo. El procedimiento para la priorización consistió en colocar en orden ascendente de PCI los tramos de la ruta que se van a intervenir en el transcurso de los 10 años. Se cuantifica el presupuesto necesario para reparar cada tramo y se observa cuales inversiones son más urgentes para no permitir que ningún tramo descienda de 40, lo cual significaría una inversión mayor en los próximos años. Cada año se va realizando el mismo ejercicio, interviniendo los tramos que a juicio se consideren más urgentes de reparar para que al término de 10 años, la Ruta N° 4 presente valores de PCI aceptables y con condiciones de

Conclusiones y Recomendaciones

Uno de los mayores beneficios de los planes de inversión de largo plazo es evaluar el impacto de las decisiones que se toman en el presente en la red de carreteras en términos económicos y de desempeño. Estos planes son una herramienta que facilitan a los niveles ejecutivos de las agencias de transporte a tomar decisiones adecuadas, exponer la transparencia de la inversión de fondos públicos para la rendición de cuentas y a justificar la inversión necesaria que se requiere para poder mantener la red de carreteras en un estado adecuado. Los escenarios de inversión presentados utilizan las premisas fundamentales de un Sistema de Administración de Carreteras, el cual consiste en aplicar la medida de mantenimiento (tratamiento) de acuerdo a la condición de este activo, en el lugar adecuado y en el momento adecuado; de esta forma, es posible maximizar la inversión.

El escenario de ejecutar únicamente reconstrucción (PCI 64 - más bajo de todos los escenarios) confirma el concepto de preservación de pavimentos, el cual indica el beneficio de conservar los pavimentos en buen estado y no esperar a intervenirlos cuando ya llegaron a un estado pobre. En vista de la ausencia en el país de aplicación de lechadas asfálticas como parte del mantenimiento de preservación de pavimentos, se utilizó la aplicación de sobrecapas no estructurales de 5 cm (políticas vigentes en el año 2008). No obstante, las lechadas asfálticas son de menor costo y muy efectivas para preservar los pavimentos, así como toda la familia de técnicas de preservación (su aplicación depende del nivel de tránsito) por lo que su aplicación puede optimizar aún más la inversión.

El resultado obtenido en esta investigación es factible de ejecutar y es un escenario importante para la solicitud y justificación del presupuesto. Se recomienda monitorear el desempeño (condición y duración) de las estrategias de mantenimiento y de pavimentos que se han reconstruido en Costa Rica, con el propósito de retroalimentar estos planes de inversión y actualizarlos. Además debe mantenerse un inventario de los activos y el registro histórico de las intervenciones de mantenimiento realizados. Estos aspectos son también parte del Sistema de Administración de Carreteras. Una de las ventajas para la aplicación de esta metodología para Costa Rica en donde puede existir información limitada, es que para el desarrollo de los planes de inversión se puede utilizar pocas variables de información. La metodología también es una alternativa factible para optimizar los recursos disponibles y solicitar mayor presupuesto. Experiencias en el Departamento de Transportes de la provincia de New Brunswick de Canadá al implementar el Sistema de Administración de Carreteras y al crear escenarios de inversión como los presentados en esta investigación,

dieron como resultado que se triplicara la asignación presupuestaria para los próximos tres años. Como consecuencia de ello, se triplicó la necesidad de consultorías para diseños y la demanda de empresas constructoras para pavimentos y puentes. Evidentemente, la condición de la red de carreteras también está mejorando, así como la satisfacción de los usuarios e imagen del gobierno en turno y del departamento de transportes (ejecución de obras y rendición de cuentas debido a la eficiencia de la inversión).

Es necesario enfatizar que debido a la ausencia del Sistema de Administración de carreteras en Costa Rica, la estructura organizacional de CONAVI actual no es adecuada, debido a que toda la Modelos de optimización lineal para realizar planes de inversiones de largo plazo en una red de pavimentos red estudiada es asignada a un departamento que tienen como funciones realizar actividades de conservación de las vías, las cuales, para la estructura de pavimentos consisten en ejecutar bacheos con mezcla asfáltica en caliente, sobrecapas de asfalto estructurales y no estructurales; actividades que se aplican a pavimentos con condiciones de regular a muy bueno (PCI mayor a 40). Es por ello que es imperativo abordar el aspecto organizacional en la implementación de estos sistemas.

Adicional a la estructura de pavimento, la metodología aquí presentada puede incorporar la optimización de otros activos de la carretera tales como puentes, alcantarillas, componentes de la seguridad vial, etc. Para ello, es necesario tener los inventarios de estos activos, el desarrollo de sus curvas de deterioro y el diseño de un indicador de condición.

La meta final es desarrollar planes de inversiones y planificación que integre todos los activos de la carretera. La gestión de la infraestructura vial deberá atender factores de estructuras viales, movilidad (congestión), seguridad vial, vulnerabilidad geotécnica, entre otros. El primer paso es generar una base de datos que integre todos los inventarios viales, incluyendo accidentalidad y que incorpore datos históricos de actividades de mantenimiento que se ejecutan en las carreteras; todos estos referenciados geográficamente.

Bibliografía

¹ Halim, A., Tighe, S. "Development of a Simplified Approach for Assessing the Level of Safety of a Highway Network Associated with Pavement Friction". Transportation Research Board, 2009.

² Halim, A., Tighe, S. "Development of a Simplified Approach for Assessing the Level of Safety of a Highway Network Associated with Pavement Friction". Transportation Research Board, 2009.

³ Lindenmann, H. "Is the correlation between pavement skid resistance and accident frequency significant?". Transportation Research Board, Washington, D.C., 2004.

⁴ Kuttesch, J., 2004. Quantifying the Relationship between Skid Resistance and Wet Weather Accidents for Virginia Data. Thesis submitted to the faculty of Virginia Polytechnic Institute and State University. Blacksburg, VA.

⁵ Meegoda, J., Gao, S., et ál. "Prediction of Skid Resistance using Pavement Texture Data Collected at High Speeds." Transportation Research Board, Washington, D.C., 2009.

⁶ Murad, M., Abaza, A. . "Pavement Friction in a Program Aimed at Reducing Wet -Weather Traffic Accidents at the Network Level". Transportation Research Board, Washington, D.C., 2006.

⁷ W. R. Hudson y H.E. de Solminihac. Un concepto de Administración de Pavimentos para países en desarrollo. Universidad de Texas, en Austin y Departamento Ingeniería de Construcción Pontificia Universidad Católica de Chile.

⁸ Amador Luis, Mrawira Donath, Zhong Ming (Noviembre 2007). *Aplicando un SIG en Transportes para Desarrollar un Modelo de Desempeño de Infraestructura Vial y un Sistema de Planificación a Largo Plazo para una Red de Carreteras*; Universidad de New Brunswick – Canadá.

⁹ Informe de Evaluación de la red vial nacional pavimentada de Costa Rica Año 2008. LanammeUCR.

¹⁰ SPEC (*Specification Conformity Analysis*). Área de Evaluación de Contratos y Asuntos Federales de la Autoridad de Carreteras y Caminos de Puerto Rico.

¹¹ Arc View GIS 3.2. Environmental Systems Research Institute (ESRI), Inc. 1999

¹² Referencia índices de accidentalidad

¹³ Orozco. O. Zonificación Climática de Costa Rica para la gestión de la Infraestructura Vial. Proyecto de Graduación. Universidad de Costa Rica, 2008.