

Erick Acosta Hernández*

erick.acostahernandez@ucr.ac.cr

Unidad de Seguridad Vial y Transporte - LanammeUCR

Roy Barrantes Jiménez, Jairo Sanabria Sandí, Cristian Valverde Cordero
roy.barrantes@ucr.ac.cr, jairo.sanabria@ucr.ac.cr, cristian.valverde@ucr.ac.cr
Unidad de Gestión y Evaluación de la Red –LanammeUCR

1



Metodología para determinación de zonas de riesgo de accidentes viales. EJE TEMÁTICO: INFRAESTRUCTURA VIAL Y EQUIPAMIENTO

RESUMEN

En Costa Rica, el sistema interinstitucional de bases de datos de accidentes de tránsito se encuentra en etapa de desarrollo. La información existente es muy limitada, por lo que se dificulta la investigación en el área de la seguridad vial, como por ejemplo la determinación de tramos de concentración de accidentes.

El LanammeUCR, realizó una investigación que inicialmente evaluó las condiciones de riesgo potencial de accidente asociado a al grado de cumplimiento de cuatro categorías de parámetros relacionados con la infraestructura vial y su entorno. El estudio se realizó en 1000 km de carretera de cuatro de las rutas principales del país. Los parámetros estudiados fueron fricción del pavimento, retrorreflexión de la demarcación vial, alineamiento geométrico de la carretera y variables climáticas. Los valores experimentales de cada categoría fueron medidos directamente en cada carretera por medio de equipos de medición y recolección de imágenes georreferenciales de alta resolución. Las variables climatológicas se estudiaron a partir de información meteorológica del país.

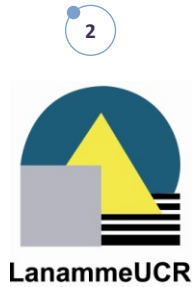
En este artículo se presentan los resultados obtenidos a partir de la aplicación de una metodología de vulnerabilidad de carreteras. Esta propuesta metodológica consiste de una superposición de valores para cada categoría de los parámetros en estudio, cuyo producto final es un perfil de susceptibilidad por tramo de carretera relacionado a la probabilidad de riesgo de accidente debido a la convergencia de los factores estudiados. Los resultados obtenidos permiten identificar tramos de las vías en los que es prioritario invertir en medidas de mitigación para reducir el riesgo de accidente asociado a con los factores estudiados. Además, estos resultados se pueden correlacionar con datos de accidentes de tránsito para la determinación de zonas de concentración de accidentes donde se pueden realizar evaluaciones de seguridad vial a partir de imágenes de alta resolución.

*Autor de correspondencia

1. INTRODUCCIÓN

La mayoría de los accidentes viales no pueden ser relacionados a un único evento causal son el resultado de la convergencia de una serie de eventos que están influenciados por una combinación de factores contribuyentes (hora del día, la atención del conductor, velocidad, condición del vehículo, diseño del camino, etc.). Estos factores contribuyentes influyen la secuencia de eventos anteriores, durante y posteriores a un accidente. En términos generales se pueden identificar tres momentos causales dentro de un evento de colisión:

1. Los eventos anteriores a la colisión revelan factores que contribuyeron al riesgo de ocurrencia, y cómo la colisión pudo haber sido prevenida.
2. Los eventos durante la colisión revelan factores que contribuyeron a la severidad de la misma y cómo estos factores pueden ser intervenidos con soluciones ingenieriles o cambios tecnológicos que reduzcan la severidad del evento.
3. Los eventos posteriores a la colisión revelan factores que influyen el resultado de la colisión y cómo el daño y las heridas pueden ser reducidos por mejoras en la respuesta de emergencia y tratamiento médico.

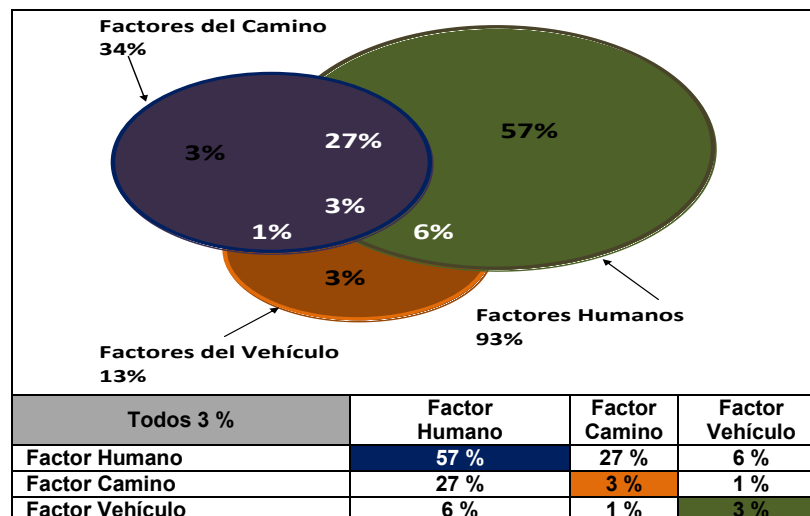


Las colisiones poseen las siguientes tres categorías de factores contribuyentes:

- Humano- incluye la edad, juicio, habilidad del conductor, atención, fatiga, experiencia, sobriedad;
- Vehículo- incluye diseño, manufactura, y mantenimiento ;
- Vía/Ambiente- incluye el alineamiento geométrico, sección transversal, dispositivos de control de tráfico, rugosidad superficial, pendiente, señalización, clima, visibilidad.

Comprendiendo estos factores y cómo éstos pueden influenciar la secuencia de eventos, las colisiones y su severidad pueden ser reducidas implementando medidas específicas que apuntan a factores contribuyentes específicos. La contribución relativa de estos factores en las colisiones puede ayudar a determinar cómo asignar recursos para reducir colisiones. La investigación por tratamiento en la proporción relativa a los factores contribuyentes es resumida en la Figura 1. La investigación fue realizada en 1980 y por lo tanto, las proporciones relativas tienen carácter informativo.

Figura 1
Combinación de factores contribuyentes a colisiones vehiculares (AASHTO, 2010)



Un marco para relacionar la serie de eventos en una colisión con las categorías de factores contribuyentes a colisiones es la matriz de Haddon (AASHTO, 2010). La matriz de Haddon ayuda a crear orden cuando se está determinando cuales de los factores contribuyentes influyen a una colisión y cual periodo de la colisión influyen los factores

Dentro de las estrategias para influenciar las anteriores y reducir colisiones y la severidad de colisiones incluyen:

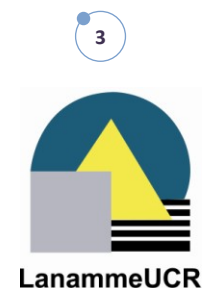
- Diseño, planificación y mantenimiento puede reducir colisiones mejorando y manteniendo el sistema de transportes, como ajustar las fases de las señales. La severidad de colisiones también puede ser reducida seleccionando tratamientos apropiados, como el uso de barreras medianeras para prevenir colisiones frontales.
- Políticas/legislación puede reducir colisiones influenciando el comportamiento humano y el diseño de caminos y automóviles. Por ejemplo, las leyes pueden prohibir el uso del celular mientras conduce, requerimientos mínimos de diseño, uso obligatorio de cascos o cinturones de seguridad.
- Administración de la demanda /reducción a la exposición puede reducir colisiones reduciendo el número de eventos en el sistema de transporte para el cual el riesgo de una colisión puede aumentar. Por ejemplo, incrementar la disponibilidad de tránsito masivo reduce el número de pasajeros en vehículos sobre el camino y por lo tanto una reducción potencial en la frecuencia de las colisiones puede ocurrir debido a menos exposición.

No existe una relación directa entre factores contribuyentes individuales y estrategias particulares para reducir los accidentes viales, sin embargo, es imperativo que los encargados de la gestión de las vías dispongan de mecanismos científicos y tecnológicos que les permitan conocer las necesidades de su red vial, para poder generar medidas que busquen mitigar los riesgos a los que se expone el usuario en la carretera para planificar las inversiones desde la perspectiva de la seguridad vial, en puntos prioritarios de la red.

2. METODOLOGÍA

El enfoque de esta valoración se centra en identificar factores de la carretera que contribuyen en generar un alto grado de exposición a condiciones adversas para los usuarios, donde el peor escenario lo conforman los accidentes como consecuencia. De manera inicial, se emplearon como datos algunos elementos inherentes de las rutas en análisis y a su vez se analizó el estado actual de elementos necesarios para mantener un nivel de seguridad en carretera, como lo son demarcación horizontal y el agarre superficial, los cuales requieren un constante monitoreo y mantenimiento para asegurar el cumplimiento de sus funciones. El producto final consta de un perfil de susceptibilidad, que se define como la posibilidad de que ocurra un evento ante la confluencia de los factores en estudio.

En esta evaluación se aplicó una metodología adaptada de los análisis de vulnerabilidad, que se realizan en el LanammeUCR desde el año 2000, ejecutado por la Unidad de Gestión y Evaluación de la Red Vial Nacional del Programa de Infraestructura del



Transporte (PITRA), la cual se basa en la ponderación individual de valores en función de categorías de agrupación, para su posterior combinación y análisis de vulnerabilidad total a partir de un perfil de susceptibilidad, este tipo de análisis se ha llevado a cabo en distintos tramos de la Red Vial Nacional de Costa Rica desde el año 2009.

El objetivo general de esta metodología es construir un perfil de niveles de susceptibilidad de accidentes viales mediante la identificación de tramos donde se presenten condiciones de riesgo potencial por incumplimientos en cuatro parámetros iniciales, retroreflectividad de la demarcación vial, la peligrosidad al deslizamiento, clima y la geometría de las vías, con el fin de determinar secciones críticas de análisis que permitan realizar una evaluación de seguridad vial completa de todos los elementos de la seguridad vial por medio del equipo de imágenes georreferenciadas y evaluaciones “in situ”.

4



LanammeUCR

2.1 Perfil de Susceptibilidad

Para el cálculo del perfil de susceptibilidad se emplea el principio de superposición de factores, para este efecto se procede a asignar valores arbitrarios (valores relativos) que asocien el valor obtenido en un tramo con el nivel de susceptibilidad, empleando una escala genérica de valores entre 0 y 10, para los factores antropogénicos del entorno cuya característica se puede medir (retroreflectividad, agarre superficial) y valores entre 0 y 5 para los factores propios del entorno que afectan en forma directa y cuya condición no se puede controlar o cambiar debido a su naturaleza.

Se emplean tramos de 100 metros como la unidad de análisis y se asignan los valores correspondientes para todos los factores involucrados en el estudio. Una vez caracterizadas las unidades de análisis, se suman los valores asignados a cada factor, entre mayor sea el número obtenido por la suma de factores, la cantidad de elementos críticos presentes en la unidad de análisis es mayor. La distribución de frecuencias sirve como herramienta para analizar la distribución de los datos respecto a la media y el uso de la curva de mejor ajuste que cuantifique el nivel de variabilidad del modelo empleado.

El análisis de la curva de acumulación de frecuencias se emplea para analizar los cambios del comportamiento de los datos permitiendo separar en rangos las frecuencias obtenidas en el análisis. La

ejemplifica el proceso de análisis empleado, el cual se basa en identificar zonas donde confluyen los factores en análisis, se pondera en forma numérica los diversos elementos mediante valores, a mayor valor el peso para cada componente asignado refleja una condición más crítica y las unidades de análisis suman estos valores para identificar el nivel de susceptibilidad, generalmente todos los resultados se muestran en un mapa que respeta la convención de categorías de la curva de frecuencias acumuladas.

Para las condiciones inherentes de la ruta o condiciones cuyo efecto es directo pero que no es posible intervenirlos ya sea por su naturaleza o por ser una característica morfológica de las zonas que atraviesan las rutas, se emplean los siguientes valores mostrados en la Tabla 1 los cuales permiten identificar zonas de mayor susceptibilidad.

La segunda agrupación de elementos lo conforman la retroreflectividad y el agarre superficial, las cuales representan componentes que requieren procesos constantes de análisis y mantenimiento a fin de mejorar la calidad del entorno empleado por los usuarios. En la Tabla 2 se resumen los valores empleados, los valores se basan en una

escala de 0 – 10 debido a su importancia en el proceso de susceptibilidad al ser valores cuyo estado se pueden mejorar mediante intervenciones.

El tipo de análisis empleado es de superposición de factores por ende al sustituir los valores de las diversas categorías se generan alrededor de 10000 datos lo cual permite analizar la distribución de frecuencias del riesgo de accidente.

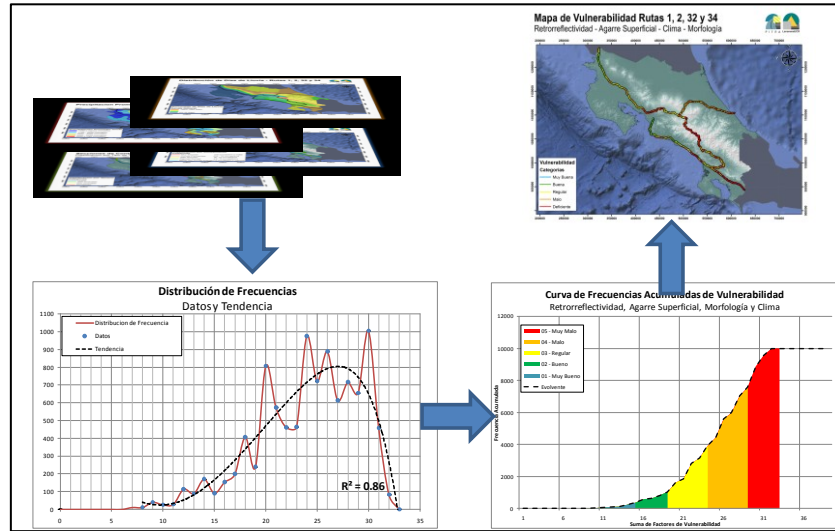


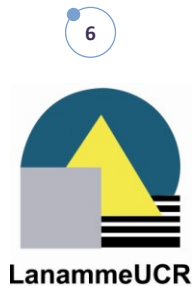
Figura 2: Esquema del procesamiento general de información para perfiles de susceptibilidad. Fuente: Lanamme UCR, 2012.

Tabla 1 Valores de susceptibilidad de factores inherentes de las rutas

Grupo	Factor	Categoría	Peso
Componente Geométricas Inherentes	Terreno	1	0
		2	1
		3	2
		4	3
	Alineamiento	5	0
		4	1
Componentes Climáticas Inherentes	Días de Lluvia	3	2
		1, 2	3
		1	0
		2	1
	Precipitación Promedio Anual	3	2
		4	3
		1	0
		2	1

Tabla 2 Valores de susceptibilidad de elementos medidos en las rutas

Grupo	Factor	Categoría	Peso
Retrorreflectividad	Retrorreflectividad Línea de Centro	1	0
		2	4
		3	8
	Retrorreflectividad Línea de Borde y Figuras	1	0
		2	4
		3	8
Agarre Superficial	Grip Number	1	2
		2	4
		3	6
		4	8



2.3 Componentes Geométricas Inherentes del Entorno

El primer factor de la carretera a revisar consta de los componentes geométricos de la carretera. Existe una amplia cantidad de componentes geométricos en cada ruta, algunos se basan en los componentes horizontales del trazado, otros en las curvas verticales, la presencia de zonas laterales de relleno y de corte de material; cada componente aporta en mayor o menor cuantía riesgos o ventajas asociados al entorno que el usuario debe afrontar.

En esta investigación, estos componentes se evaluaron a un nivel macro o de red, lo cual implica que se requieren indicadores que agrupen en forma implícita uno o varios elementos geométricos, que sean representativos del tipo de riesgo al que se encuentra expuesto el usuario.

De forma inicial, se escogieron dos variables que caracterizan en forma general el alineamiento vertical y horizontal de la carretera. Para los componentes verticales se empleo el tipo de terreno y para las condiciones geométricas horizontales se empleo una categorización basada en la cantidad de curvas por kilómetro como el indicador del tipo de alineamientos presentes en las rutas.

2.3.1 Tipo de Terreno

La primera categorización comprende las secciones de la carretera según el tipo de terreno que les corresponde. De las bases de datos se cuenta con una clasificación basada en el tipo de terreno mostrado en la Tabla .

Tabla 3: Categorías según el tipo de terreno para secciones de control

Categoría del Terreno	Descripción
1	LLANO
2	ALGO ONDULADO
3	MUY ONDULADO
4	MONTAÑOSO

Al aplicar las categorías a las rutas en estudio, se consigue distribuir aspectos de riesgo asociado a la zona o tipo de terreno por la cual se distribuye la infraestructura y que se requieren para el respectivo análisis de susceptibilidad.

Al aplicar las categorías mostradas en la Tabla mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica en las rutas de análisis, es posible definir tramos con distintas categorías de terreno y ubicarlos con gran precisión definiéndose así la primera capa en el análisis de susceptibilidad.

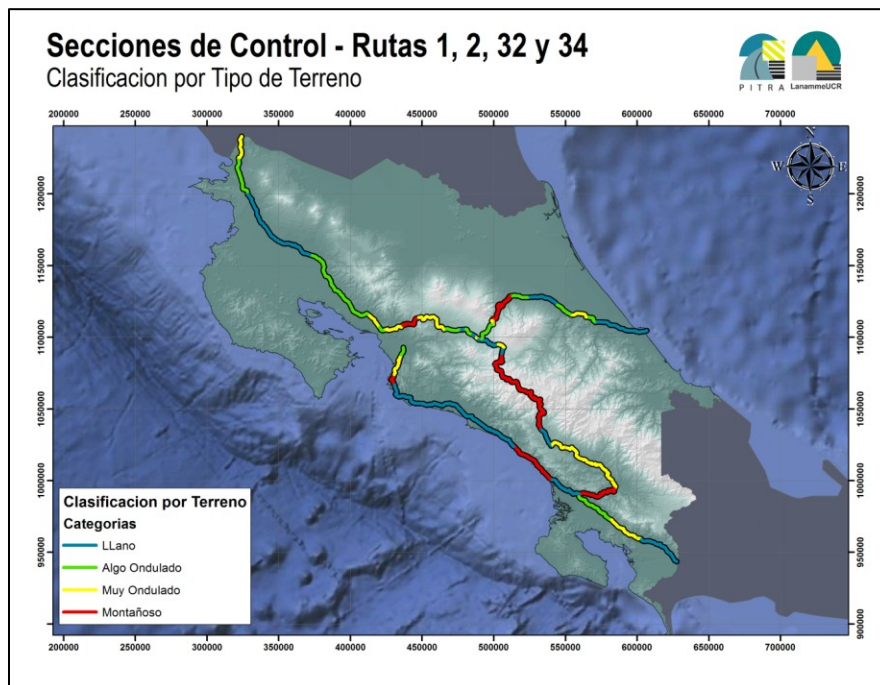


Figura 3: Clasificación de las secciones de control por tipo de terreno

2.3.2 Alineamiento

La segunda variable que se agrego al análisis de características del entorno geométrico, es el alineamiento, para el cual se asocian las clasificaciones derivadas de información de sistemas de información geográfica del LanammeUCR y basadas en datos del Ministerio de Obras Públicas de Costa Rica (MOPT). Para el análisis de este parámetro se contabilizan la cantidad de curvas presentes en el alineamiento a lo largo de un kilómetro, las categorías asignadas así como su descripción se pueden observar en la Tabla 4.

Tabla 4: Categorías según el tipo de alineamiento para secciones de control

Categoría	Descripción	
1	MUY SINUOSO EN EL TRAMO	15 o más [CURVAS/km]
2	CURVAS FRECUENTES EN EL TRAMO	10 - 15 [CURVAS/km]
3	ALGO SINUOSO CON CURVAS CERRADAS	5 - 10 [CURVAS/km]
4	ALGUNAS CURVAS	2 - 5 [CURVAS/km]
5	RECTO CON CURVAS SUAVES	0 - 2 [CURVAS/km]

Al aplicar estos criterios en las rutas analizadas se obtiene la Figura , donde se observa la distribución geográfica de esta característica.

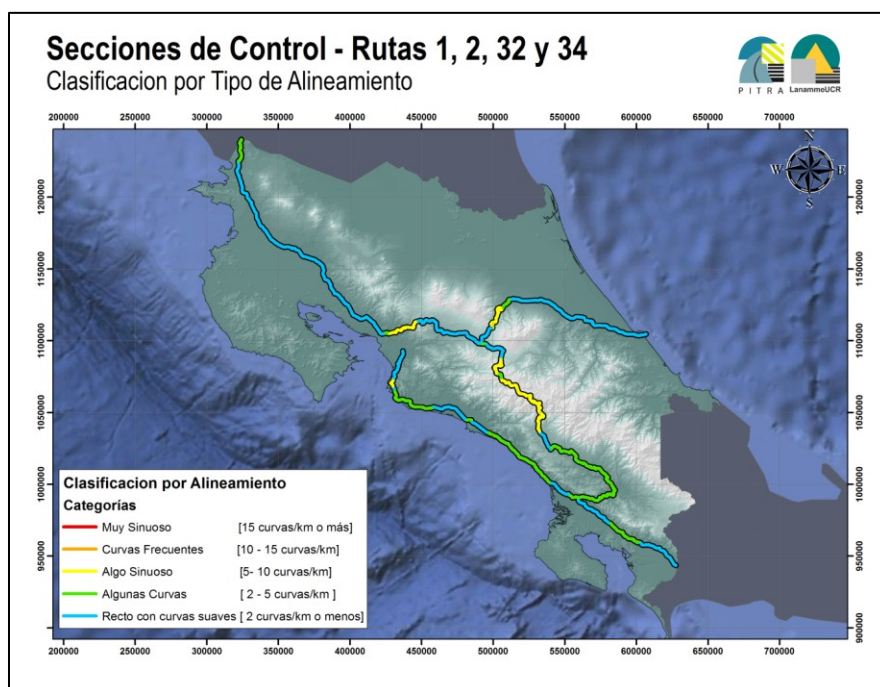


Figura 4: Secciones de Control Clasificados por alineamiento

2.4 Variables Climáticas del Entorno

Dentro de la caracterización de los factores del entorno que afectan las rutas, el clima conforma una variable cuya distribución aleatoria y comportamiento basado en cambios estacionales requiere del uso de datos estadísticos anuales para ponderar el comportamiento y analizar su impacto en la infraestructura.

El análisis emplea dos características, basados en estadísticas anuales:

- La distribución de días de lluvia en un año para todo el país.
- La Precipitación Promedio Anual que estima la cantidad de milímetros de agua precipitada en un año basado en las mediciones de estaciones meteorológicas.

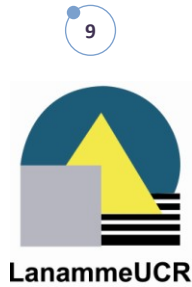
El uso de estos elementos permite cuantificar la distribución en el tiempo y la distribución espacial de la lluvia y establecer ponderaciones que indiquen el nivel de amenaza al cual se enfrenta un usuario al recorre una ruta, desde un punto de vista climático.

2.4.1 Distribución de días de lluvia

De datos del año 2000 del IMN(Solano & Villalobos, 2000), se desprende la información empleada para definir las distribuciones de días con lluvia al año, este modelo se subdividió en categorías que se muestran en la Tabla 5 donde se definen 5 rangos uniformes para poder calificar las zonas por las cuales pasan las carreteras en estudio.

Tabla 5: Clasificación según la distribución porcentual de días de lluvia al año

Categoría	Condición	Descripción
1	Muy bajo	Entre 0 - 20 % de días con lluvia al año
2	Bajo	Entre 20 - 40 % de días con lluvia al año
3	Regular	Entre 40 - 60 % de días con lluvia al año
4	Alto	Entre 60 - 80 % de días con lluvia al año
5	Muy Alto	Entre 80 - 100 % de días con lluvia al año



La Figura 5 muestra la distribución de esta clasificación en el mapa de Costa Rica, lo cual permite asignar en forma espacial el indicador empleado para describir la distribución temporal de la lluvia y su influencia sobre las rutas analizadas

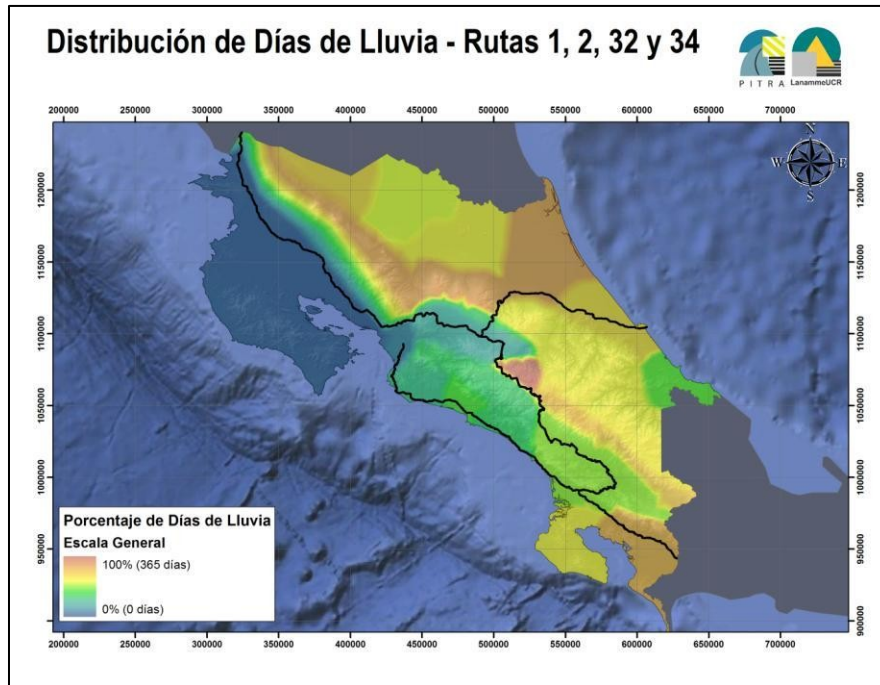


Figura 5: Distribución porcentual de los días de lluvia al año

2.4.2 Precipitación promedio anual

Los datos de precipitación promedio anual se derivan de los mapas del atlas climatológico (Barrantes & al, 1986), los cuales permiten inferir los comportamiento globales de la precipitación en el país como un indicador, para poder emplear estos datos se empleo la clasificación de la Tabla .

Tabla 6 Clasificación según la Precipitación Promedio Anual

Categorías	Descripción
1	2000 o menos [mm/año]
2	2000 – 3000 [mm/año]
3	3000 – 4000 [mm/año]
4	4000 o más [mm/año]



La Figura muestra en el mapa de Costa Rica como se distribuyen las zonas bajo la clasificación, de esta forma se pueden identificar en las rutas la distribución espacial de la cantidad de lluvia al año.

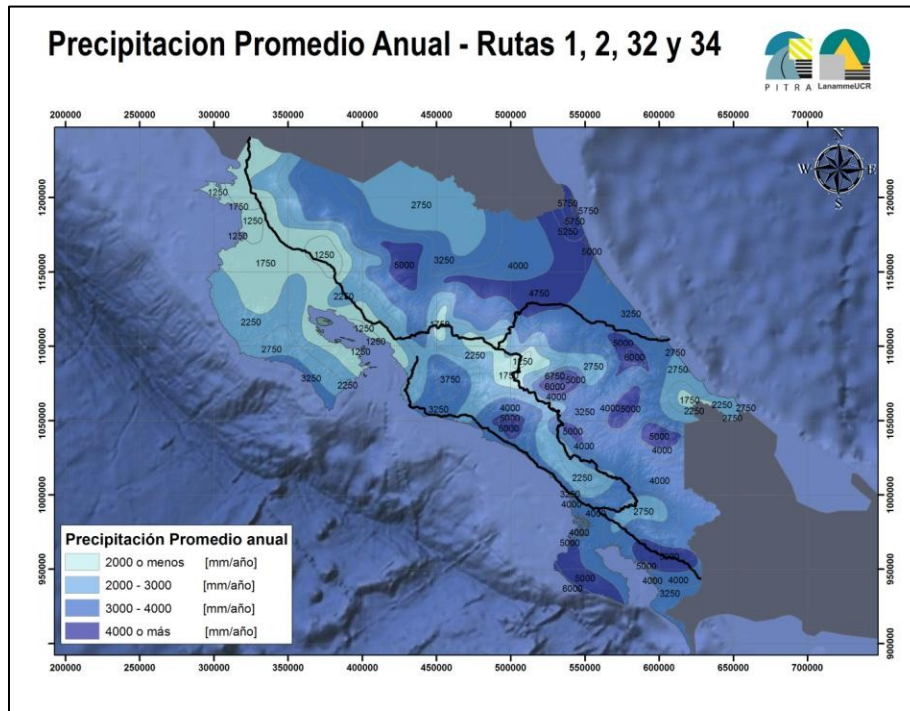


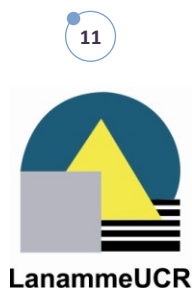
Figura 6: Precipitación Promedio Anual

2.5 Condiciones de la Infraestructura

Los elementos restantes del análisis se componen de la medición de parámetros propios de de la carretera, se midieron dos características asociadas: la retrorreflectividad de la pintura horizontal (blanca para líneas de borde, amarilla en la línea de centro) y del nivel de agarre superficial (coeficiente de fricción del pavimento).

2.5.1 Coeficiente de rozamiento de superficie (GRIP)

Un aspecto muy importante en la seguridad vial, es el nivel de agarre o fricción que experimenta la llanta del vehículo con la carretera. A mayor nivel de rozamiento, mayor es la fuerza que trata de oponerse al deslizamiento del vehículo, lo cual es necesario por ejemplo cuando el conductor debe tomar una curva a una velocidad moderada en carreteras principales o rotondas, o cuando debe realizar una frenada de emergencia. Por otro lado, pavimentos con nivel de rozamiento bajo brindan condiciones inseguras para los usuarios, siendo el derrape o pérdida del control del vehículo la causa común de accidentes en rutas que presentan esta condición. Como se deriva de lo anterior, 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 nivel de rozamiento de la superficie depende de varios factores, siendo los principales la macro textura y la micro textura de la mezcla asfáltica o concreto utilizado en la vía. La macro textura se relaciona directamente con el tipo de agregado expuesto en la mezcla obtenida; y afecta directamente la capacidad de drenaje del agua en la superficie de la vía. A mayor macro textura, mejor capacidad de drenaje, pero en detrimento del desgaste de las llantas de los vehículos. A menor macro textura, menor la capacidad de drenaje de la carretera, que ante ciertas condiciones de cantidad de agua superficial y velocidad de los vehículos produce el fenómeno llamado hidropneumático: la llanta no se encuentra en contacto directo con la superficie, sino que entre ambos se forma una pequeña película de agua, lo que conlleva a la pérdida del control del vehículo al maniobrar. La Tabla 7 muestra la clasificación internacional del pavimento según el Grip Number (GN).

Tabla 7 Clasificación internacional del pavimento según el GN.

GN	Condición	Nivel			Categoría
		Deslizamiento	Peligrosidad	Riesgo medio de accidentabilidad	
< 0,50	Malo	Muy deslizante	Muy peligroso	mayor a 20	4
0,50 – 0,60	Regular	Deslizante	Peligroso	16 a 20	3
0,60 – 0,78	Bueno	Poco deslizante	Moderado	10 a 16	2
> 0,78	Muy Bueno	No deslizante	Seguro	menor a 10	1

* 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.

El equipo utilizado por el LanammeUCR para medir el coeficiente de rozamiento es del tipo que utiliza una rueda parcialmente bloqueada en dirección de la trayectoria seguida, y es conocido a nivel internacional como Griptester. el coeficiente internacional de fricción IFI, si se conoce la textura de la superficie de rueda. La ventaja de este aparato es su

facilidad de operación, su reducido tamaño que no necesita de un vehículo dedicado, y que permite tomar mediciones continuas en las carreteras (ver Figura).



Figura 7: Equipo Griptester

2.6 Retrorreflectividad de pintura.

Dentro de los aspectos fundamentales en el diseño y operación de una vía se encuentra la demarcación horizontal, la cual se encuentra en función de las características geométricas de la carretera y debe ser capaz de informar a los usuarios el sentido de tránsito, la delimitación de la zona de rodaje, la cantidad de carriles, zonas de seguridad (islas), maniobras de manejo permitidas (zonas de adelantamiento y zonas de restricción del mismo), todos estos factores dependen de aspectos de ingeniería de tránsito, siendo el factor determinante para que la demarcación sea efectiva la visibilidad de los elementos empleados.

Durante el día o en presencia de iluminación la escala cromática debidamente normada y el adecuado contraste de los elementos de demarcación definen si la visibilidad es adecuada, pero el factor de seguridad está incompleto si los elementos no pueden ser visualizados durante la noche o en ausencia de iluminación por parte del entorno, la característica requerida en este caso se conoce como retrorreflectividad y es un elemento que requiere su medición mediante equipos para asegurar que la demarcación horizontal satisfice las necesidades de los usuarios mientras transitan.



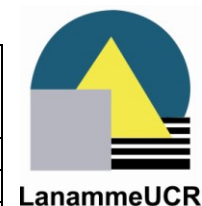
Figura 8: Equipo Laser para medición de retrorreflectividad (LaserLUX CEN 30)

Para cuantificar este parámetro de la demarcación el LanammeUCR emplea un retrorreflectómetro de alto desempeño modelo LaserLUX CEN 30, mostrado en la Figura 8, que permite medir en forma continua los valores de retrorreflectividad de la demarcación horizontal el cual basa su modo de operación en la norma ASTM E1710.

El equipo LaserLUX CEN 30 mediante un barrido laser mide los valores de retrorreflectividad de la pintura. A velocidades de operación de 100 km/h genera más de 720 mediciones/km. generando información georreferenciada y estacionada que pondera los valores obtenidos en tramos de 100 m. Los valores obtenidos se comparan con un conjunto de categorías derivadas de la investigación de valores mínimos recomendados de retrorreflectividad (Debaillon, Carlson, He, Schnell, & Aktan, 2007)

Tabla 8 Valores mínimos recomendados de retrorreflectividad

	Color de la demarcación	Caminos Rurales < 40 mph	Carretera Secundarios 45 - 55 mph	Carretera Principal > 60 mph
Con Cortaluces	Blanco	30 mcd/lx/m ²	35 mcd/lx/m ²	70 mcd/lx/m ²
	Amarillo	30 mcd/lx/m ²	35 mcd/lx/m ²	70 mcd/lx/m ²
Sin Cortaluces	Blanco	85 mcd/lx/m ²	100 mcd/lx/m ²	150 mcd/lx/m ²
	Amarillo	55 mcd/lx/m ²	65 mcd/lx/m ²	100 mcd/lx/m ²



2.7 Análisis de puntos derivados del análisis de susceptibilidad

El componente restante del estudio se basa en la selección de los tramos de estudio, cuya susceptibilidad califique como alta dentro de las categorías de análisis, a fin de calibrar el tipo de resultados obtenidos y definir las necesidades de las zonas valoradas como críticas.

Para esta etapa de la evaluación se utilizó una lista de chequeo adaptada de la “*Guía para Realizar una Auditoría de Seguridad Vial*” (Dourthé & Salamanca, 2003), con el fin de examinar de manera exhaustiva zonas de interés de las rutas en análisis e informar sobre el riesgo de ocurrencia de accidentes y del comportamiento del tramo desde la perspectiva de seguridad vial. Los tramos de análisis se eligen combinando los resultados de susceptibilidad descritos en los apartados iniciales de este informe y los tramos donde se han reportado mayor concentración de accidentes. La longitud de evaluación definida para estos tramos es de 500 m que describen un punto central seleccionado.

La Tabla 9 muestra las categorías generales que entran en este análisis y los valores asignados para ponderar su importancia entre los elementos a evaluar, cada categoría se subdivide en varias preguntas o ítems a calificar. Los valores fueron definidos a partir del criterio experto y son valores que pueden ser calibrados y validados para cada carretera en particular según su importancia.

Tabla 9 Categorías generales de las listas de auditoría de seguridad vial

Categoría	Ítem	Puntos Asignables
A	Alineamiento y Sección Transversal	2
B	Carriles de aceleración o desaceleración	4
C	Intersecciones	8
D	Señalización Vertical e Iluminación	15
E	Demarcación y delineación	15
F	Barreras de contención y zonas de despeje lateral	7
G	Semáforos	7
H	Peatones y ciclistas	9
I	Puentes y alcantarillas	8
J	Pavimentos	8
K	Provisión para los vehículos pesados	4
L	Cauces de agua e inundaciones	8
M	Varios	5
N	Alineamiento y Sección Transversal	2



Para cada caso se emplea una calificación de condición que dependerá del tramo seleccionado requiriendo un análisis inicial de si los ítems aplican o no, un ejemplo sería un tramo de carretera de montaña donde no se encuentren intersecciones, donde los valores de la categoría C no ponderan para generar la nota final de 100% de cumplimiento.

Los factores de condición se muestran en la

Tabla 9, y permiten calificar cada ítem valorando los grados de cumplimiento como totales o parciales, para contabilizar los puntos obtenidos en cada categoría.

Tabla 10 Factores de calificación

Revisión Preliminar	Condicion	Factor
No Analizar	N/A - No aplica	0
Analizar	B - Buena	1
	R - Regular	0.5
	M - Mala	0

El resultado final para los tramos en análisis corresponde a una calificación basada en el total de puntos calificables de una ruta y el grado porcentual de cumplimiento de los mismos.

2.7.1 Auscultación visual

El sistema de auscultación visual configurado para el LanammeUCR, cuenta con 6 cámaras de alta definición, sus posiciones y ángulo son establecidas con respecto a un

sistema de coordenadas locales basadas en el vehículo a fin de emplear el principio de fotogrametría. En forma simultánea el sistema integra sistemas de posicionamiento global combinando los sistemas de DMI, IMU y GPS a fin de que el sistema de posicionamiento global pueda brindar la posición exacta del vehículo basado en coordenadas geográficas u otro sistema de referencia, aún ante la pérdida temporal de la señal de satélites para el GPS u otro de sus componentes de posicionamiento global sin comprometer el nivel de detalle de la información obtenida.



Figura 9: Vehículo del LanammeUCR equipado con el equipo Trimble GEO 3D

3. RESULTADOS

La metodología descrita se aplicó en cuatro rutas de la red vial de primer orden de Costa Rica, donde se llevaron a cabo mediciones en 1000 km de Red Vial Nacional, específicamente para las rutas 1, 2, 32 y 34.

3.1 Resultados de medición de retrorreflectividad

La medición de retrorreflectividad se lleva a cabo para dos elementos de la carretera, la línea de centro de color amarillo y la línea blanca de borde y permite a los usuarios conocer datos de suma importancia para la seguridad de la ruta tal como zonas que permitan o restrinjan el adelantamiento, a su vez las líneas de borde de color blanco y las señales horizontales presentes indican los elementos restantes de la ruta como el ancho del que disponen los usuarios, presencia de uno o más carriles y las velocidades de operación, siendo la retrorreflectividad de la demarcación la medida más adecuada del grado de desempeño para las condiciones críticas a las cuales se pueden enfrentar el usuario.

Debido a lo heterogéneo de las rutas y la presencia recurrente de captaluces por tramos, se emplea la categoría que incluye los captaluces para evaluar los resultados que se obtuvieron por parte de esta medición. Se empleó como un valor límite de referencia 150 mcd/lx/m² para definir aquellas condiciones que cumplen para cualquier categoría de los valores mínimos recomendados.

3.2 Condición de línea de centro

La medición de retrorreflectividad de las líneas de centro nos indica que de 1000 km evaluados 728 km (72 %) no brindan los niveles mínimos aceptables para señalización horizontal y por otra parte los valores aceptables solo conforman 192 km (19%). En el

caso de valores muy buenos únicamente se detectan 80.2 km (8 %) principalmente en la ruta 34. El desglose de los datos se puede observar en la Figura .

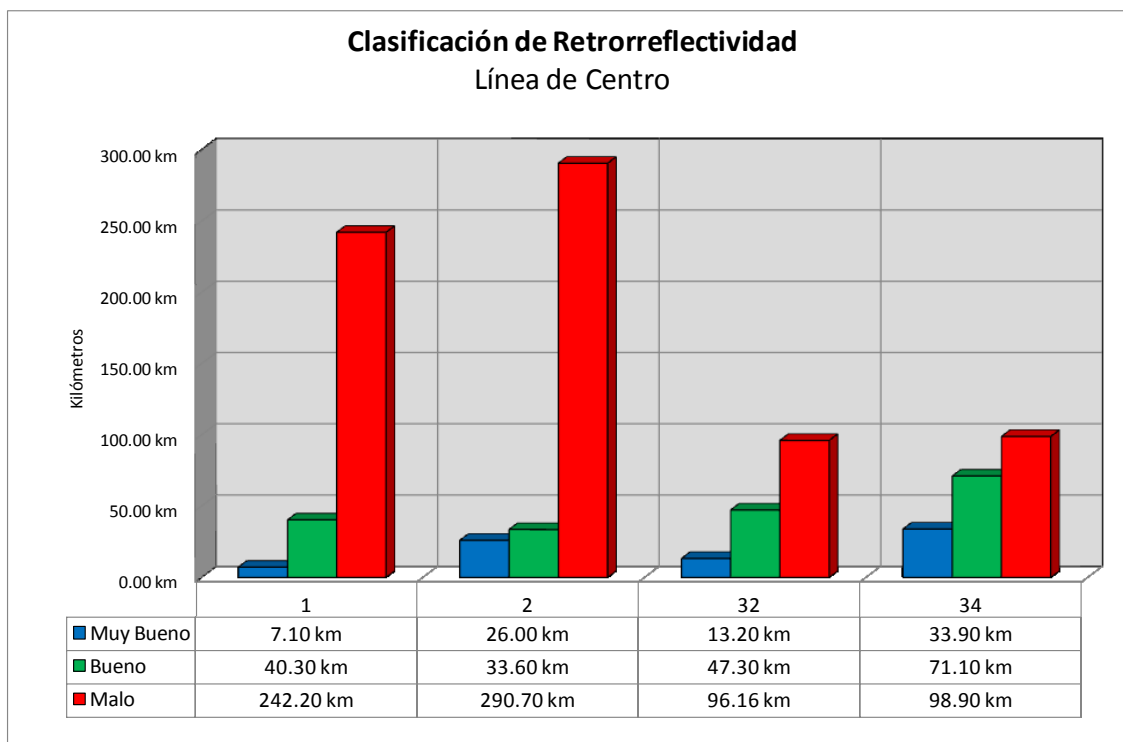


Figura 10: Gráfico de retroreflectividad de la línea de centro

La Figura 10 permite apreciar la diferencia cuantitativa de kilómetros a intervenir para mejorar las condiciones evaluadas de retroreflectividad de línea de centro, las rutas 2 y 1 poseen una mayor longitud evaluada y presentan una relación de incumplimiento de retroreflectividad superior al 80%.

Estos resultados se pueden apreciar en la Figura donde se logra apreciar la distribución geográfica de las condiciones evaluadas. Las zonas de color rojo representan los valores de retroreflectividad que no superan los 70 mcd/lux/m² definido como el valor mínimo recomendado, las zonas de color verde corresponden al rango entre 70 – 150 mcd/lux/m² mientras que el color celeste representa las zonas cuya retroreflectividad cumple para cualquiera de las condiciones de valor mínimo de retroreflectividad especificado en la

Tabla , estos valores corresponden a las especificaciones para la pintura de color amarillo en presencia de captaluces.

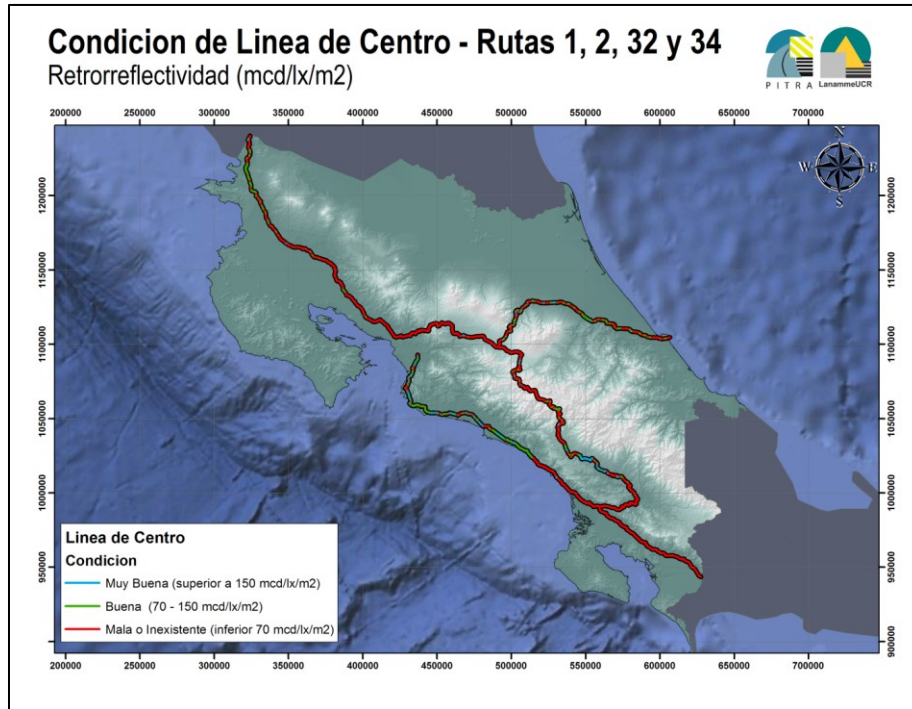


Figura 11: Mapa de la condición de la línea de centro basado en el valor de retrorreflexividad

3.3 Condición de línea de borde

La medición de retrorreflexividad de las líneas de borde y figuras nos indica que de 1000 km evaluados 721 km (72 %) no brindan los niveles mínimos aceptables para señalización horizontal y los valores aceptables solo conforman 165 km (17%), en el caso de valores muy buenos únicamente se detectan 113 km (11 %) principalmente en la ruta 34. El desglose se encuentra en la Figura .

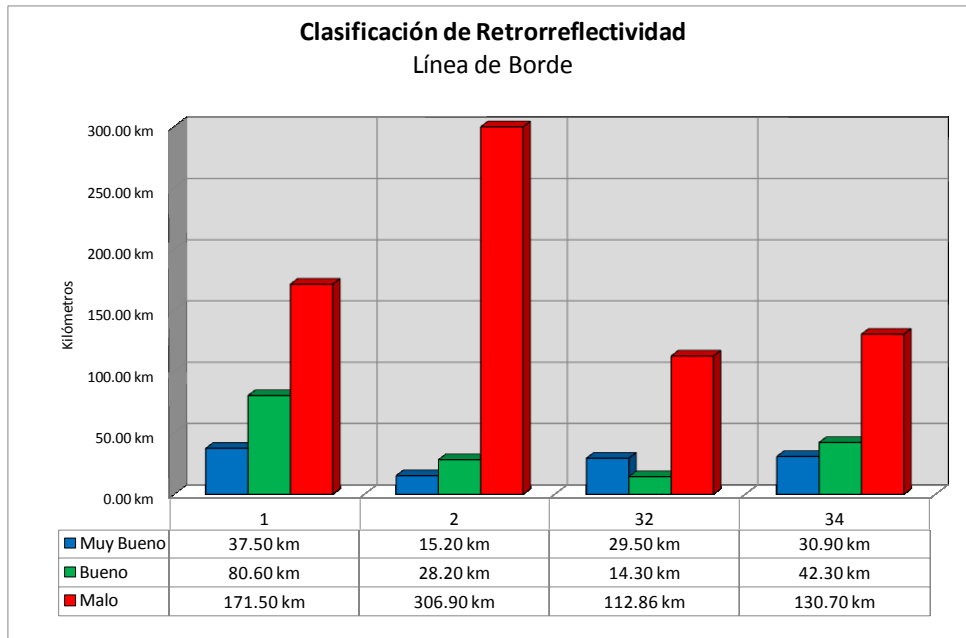


Figura 12 Gráfico de retrorreflexividad de la línea de borde

Se emplea la

Tabla para definir los valores mínimos recomendados, para la línea de borde la Figura permite apreciar la diferencia cuantitativa de kilómetros a intervenir para mejorar las condiciones evaluadas de retrorreflectividad de línea de borde y figuras, la ruta 2 mantiene una relación de incumplimiento de retrorreflectividad superior al 80%, mientras que en línea de borde la ruta 1 incumple en un 59%, en este componente las rutas 32 y 34 presentan un incremento del porcentaje de incumplimiento de 10% con respecto al valor obtenido para la línea de centro. La ubicación de los resultados obtenidos se puede apreciar en la Figura

Se puede apreciar en la Figura el uso de zonas de color rojo para los valores de retrorreflectividad que no superan los 70 mcd/lux/m² definido como el valor mínimo recomendado, las zonas de color verde corresponden al rango entre 70 – 150 mcd/lux/m² mientras que el color celeste representa las zonas cuya retrorreflectividad cumple para cualquiera de las condiciones de valor mínimo de retrorreflectividad especificado en la

Tabla, cabe destacar que las especificaciones para pintura blanca y pintura amarilla difieren en sus rangos y valores, pero para la pintura en presencia de captaluces los valores se unifican dentro de los mismo rangos.

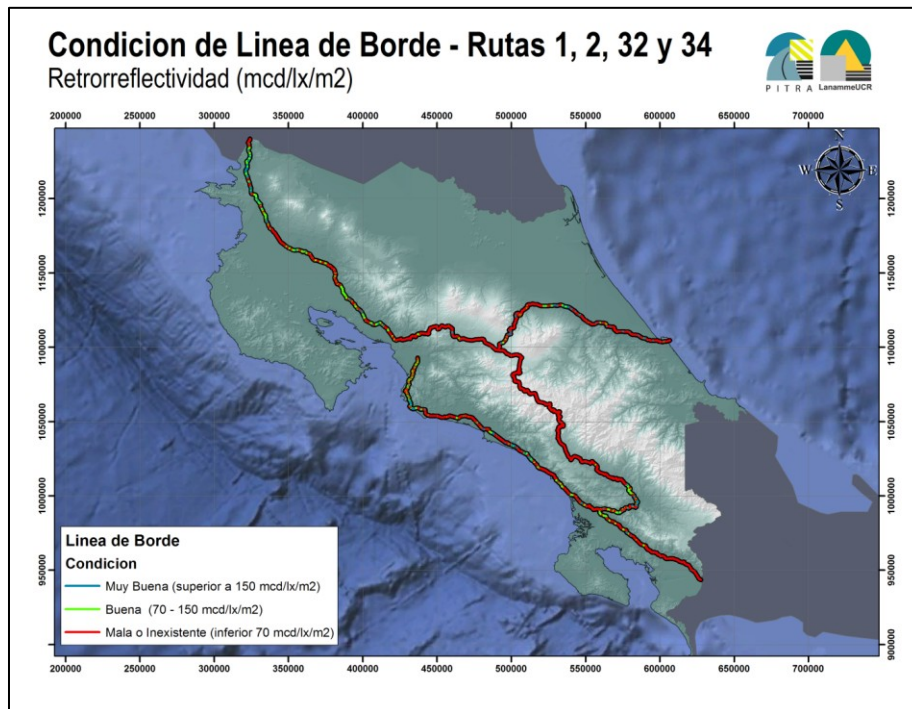


Figura 13: Mapa de la condición de la línea de borde basado en el valor de retrorreflectividad

3.4 Resultados de la medición de agarre superficial

Los valores obtenidos para este apartado provienen de la Evaluación de la Red Vial Nacional 2010 -2011, la valoración de los datos obtenidos se califica acorde a la

clasificación internacional del pavimento asociada al grip number (GN) mostrado en la Tabla y que analiza el valor calculado por el equipo de campo.

Los resultados obtenidos para las rutas en análisis se muestran en la Figura . Del total de kilómetros evaluados los valores rondan cerca de 509 km en mala condición (51%), 274 km en condición regular (28%), 164 km en buena condición (16%) y el restante 52.3 km en muy buena condición (5%).

Al graficar los resultados en forma separada para cada ruta, se puede observar como de los 509 km cuya condición de agarre es mala, la ruta 2 contabiliza 277.5 km, más de la mitad de los kilómetros valorados en esta condición. Para el resto de la rutas las categorías muestran comportamientos variados que se pueden observar los resultados obtenidos en forma geográfica en la Figura .



Figura 14: Gráfico de retroreflectividad de la línea de borde

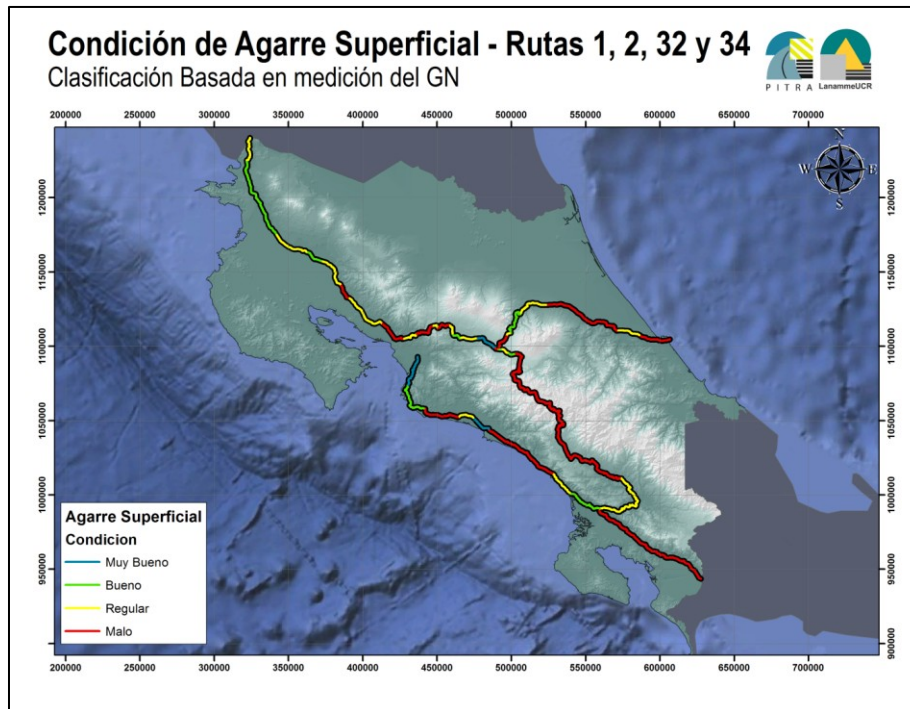


Figura 15: Mapa de la condición del agarre superficial

3.5 Perfil de susceptibilidad

La determinación del perfil de susceptibilidad se realizó con unidades de análisis de 100 m de carretera, dichas unidades reúnen todos los aspectos básicos considerados en el estudio, para cada elemento se procede a emplear escalas de ponderación que se asocian a la categoría o condición de cada componente.

La distribución de frecuencias obtenidas luego de aplicado el procedimiento de superposición se observa en la Figura . Se aprecia de la distribución como la media del análisis se da cuando los factores críticos suman 27, lo cual implica una tendencia de los datos de ubicarse en la mitad superior del rango de valores de 0 hasta 33, por ende las condiciones actuales tienden a acumularse en la zona crítica.

Con los resultados obtenidos de la distribución de frecuencia se procede a establecer la distribución de frecuencias acumuladas, para analizar la curva S del análisis de superposición, el perfil final de susceptibilidad se basa en el análisis de la curva S donde se analizan los comportamientos y se definen las categorías de frecuencias que definen la presencia o ausencia de elementos que incrementen la susceptibilidad, la Figura muestra los resultado obtenidos para las rutas del análisis.

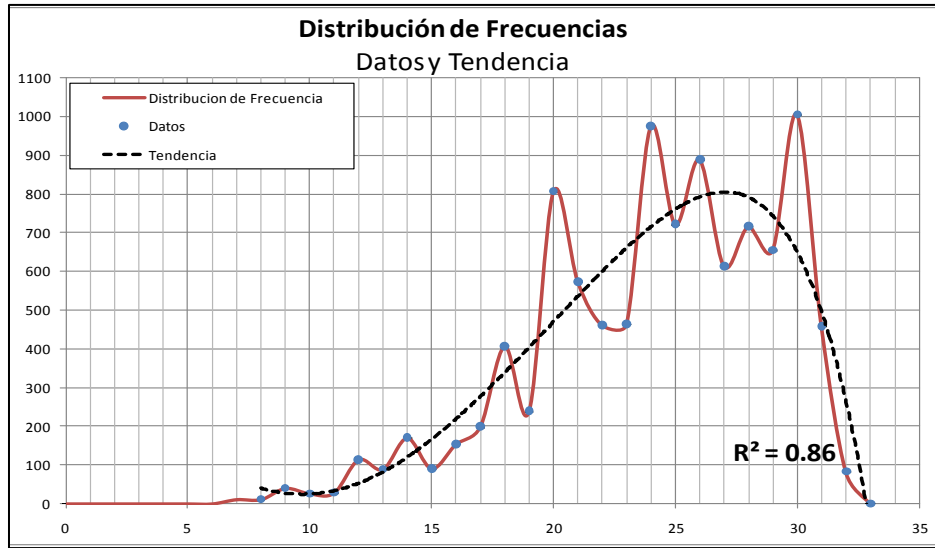


Figura 16: Distribución de frecuencias de la superposición de elementos de susceptibilidad

Una vez analizado el comportamiento de la curva S se procede a asignar la categoría obtenida por cada unidad de análisis, generando una matriz que permite comparar el comportamiento obtenido por cada rutas en función de las categorías de susceptibilidad definidas El resumen de estos resultados obtenidos se muestra en la Figura 18 donde se extrae la cantidad de kilómetros en cada condición de susceptibilidad y su peso porcentual por ruta.

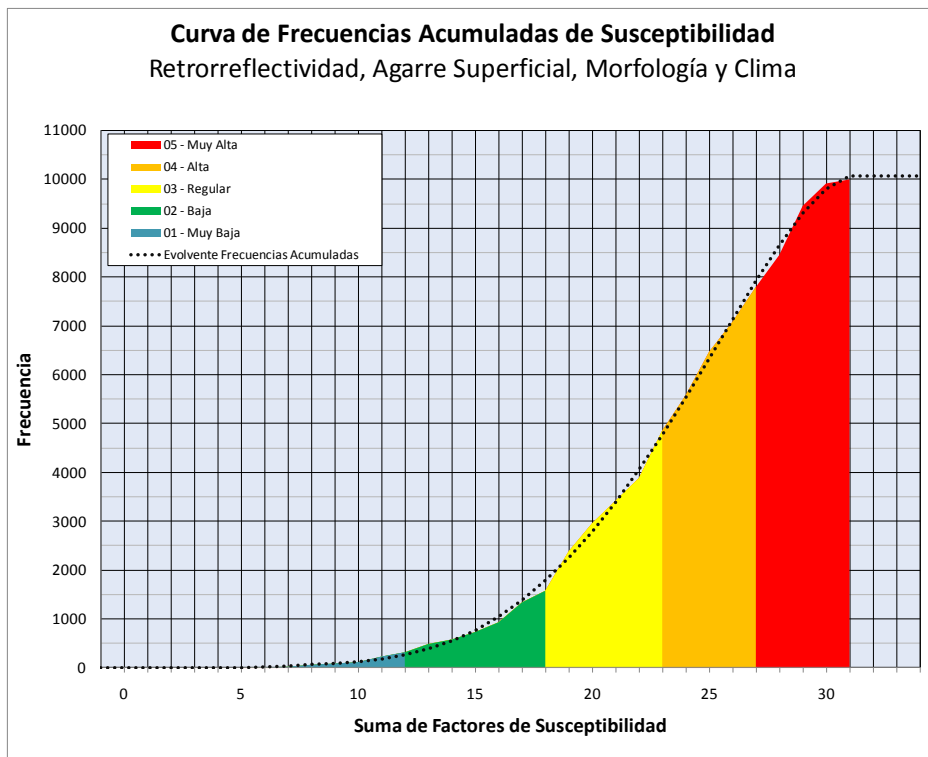
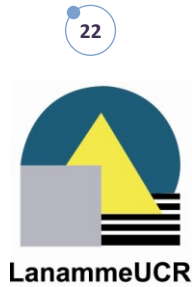


Figura 17: Distribución Acumulada de Frecuencias de Susceptibilidad

De los 1000 km evaluados la ruta 2 posee una mayor cantidad de kilómetros susceptibles con 220.1 km, lo cual equivale a la quinta parte de la evaluación que reúne malas condiciones inherentes y malas condiciones de retrorreflectividad y agarre superficial

La ruta 1 ofrece mejores los valores de susceptibilidad más bajos resultados al poseer un 76% de los datos por debajo de las escala de susceptibilidad regular, lo cual en gran medida se ve puede atribuir a condiciones inherentes más favorables, sin implicar que las valoraciones individuales de retrorreflectividad sean aceptables, la gran cantidad de zonas llanas que atraviesa, valores de precipitación bajos como parte de los factores inherentes permiten que la susceptibilidad del usuario sea menor. Las ruta 32 reparte su susceptibilidad entre las escalas Regular, Alta y Muy Alta concentrando un 94 % de su extensión. La ruta 34 presenta una tendencia a distribuir su condición en la franja Regular con un 36% pero los valores poseen una tendencia al incremento de susceptibilidad de la ruta lo cual se refleja en la escala de valores Muy Altos con un 18% que contrasta con el 5% de susceptibilidad Muy Baja



Las descripciones de las rutas como tal permiten analizar en forma cualitativa la información pero se procede a representar en forma espacial los datos de susceptibilidad empleando Sistemas de Información Geográfica como se muestra en la Figura , a fin de poder reconocer agrupaciones de zonas críticas, lo cual se requiere para poder realizar análisis de gestión que requieren las rutas para futuras intervenciones.

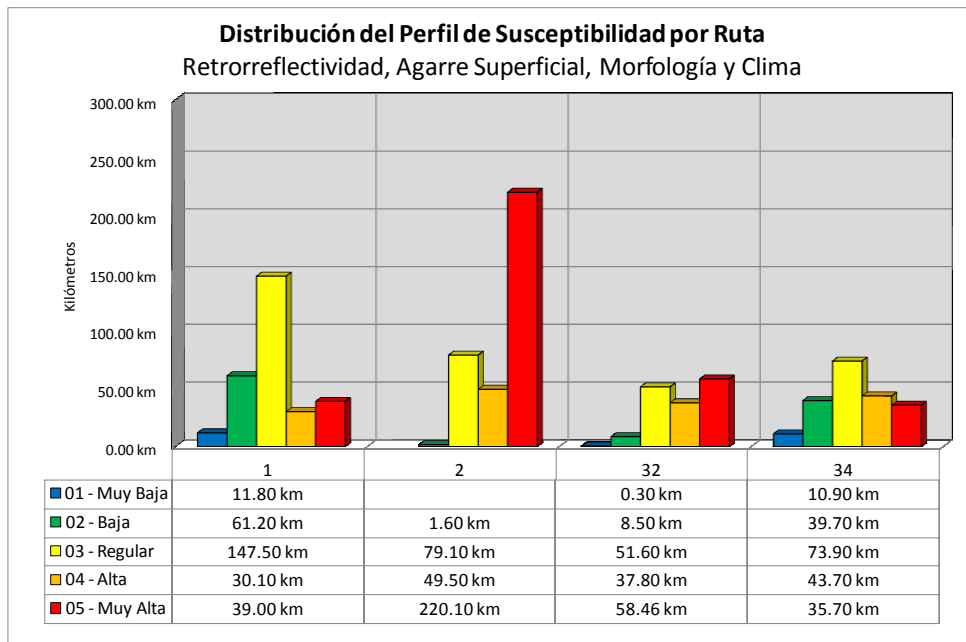


Figura 18: Condición de susceptibilidad por ruta

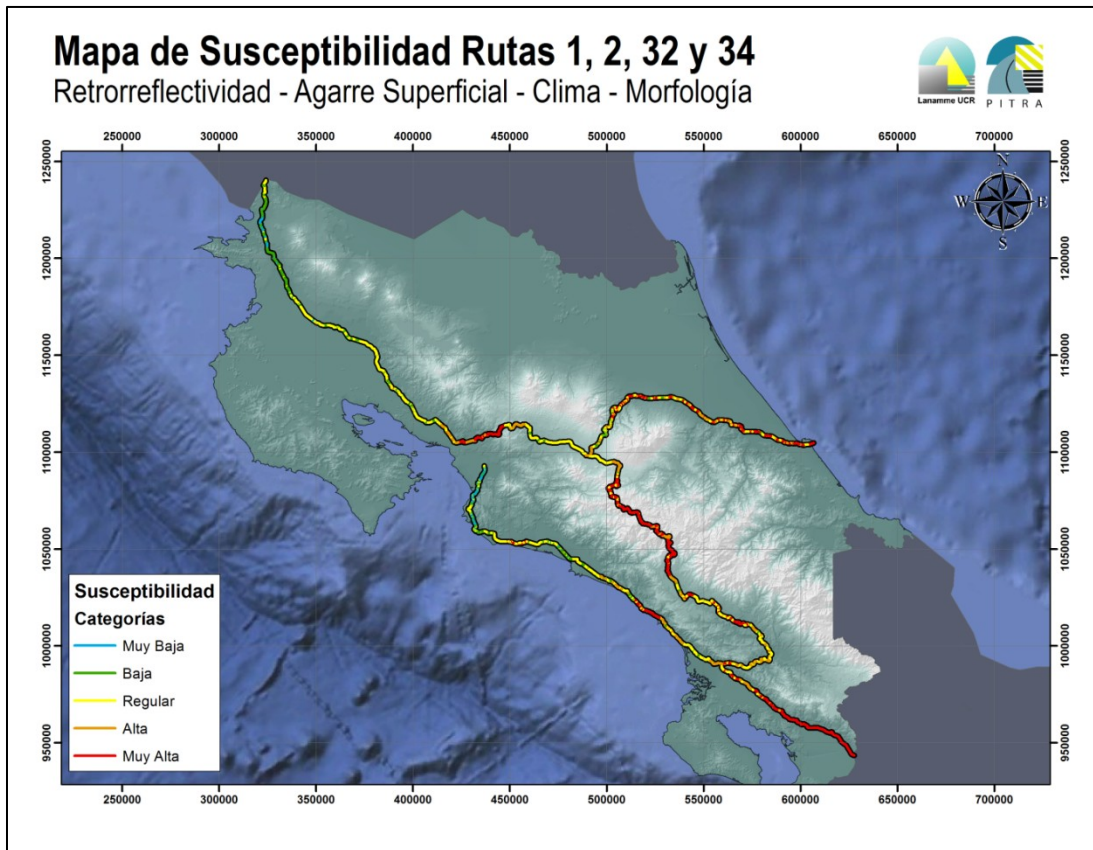


Figura 19: Mapa de la condición de susceptibilidad

En la Figura se aprecia la distribución de las condiciones de vulnerabilidad, siendo el color rojo el que representa las condiciones de susceptibilidad Muy Alta, las zonas de color naranja equivalen a la condición Alta, el amarillo se emplea para la susceptibilidad Regular, el verde para susceptibilidad Baja y celeste para Muy Baja susceptibilidad o confluencia de factores negativos.

3.6 Incorporación de datos de accidentes en el análisis de susceptibilidad

Una vez identificados los tramos con distintos niveles de susceptibilidad en los 4 corredores principales del país (Rutas 1, 2, 32 y 34) se procedió a incorporar la información disponible en el LanammeUCR sobre accidentes así como información del proyecto de graduación titulado “Análisis de ocurrencia de diferentes tipos de accidentes viales y seguridad vial en el cantón de Pérez Zeledón” (Zamora, 2007). La Figura muestra la posición de los accidentes disponibles en las bases de datos del LanammeUCR.

Debido a la inexistencia de una base de datos de accidentes oficiales y actualizados, lo cual representa una limitación de este estudio, fue necesario realizar una labor de georreferenciación de aquellos accidentes que es posible incorporarlos dentro de los Sistemas de Información Geográfica con mayor precisión. La base de datos final para las rutas analizadas incluyó cerca de 550 accidentes. La ubicación de registros permitió establecer una relación cuantitativa entre los tramos de mayor susceptibilidad y aquellas zonas con mayor presencia de accidentes.

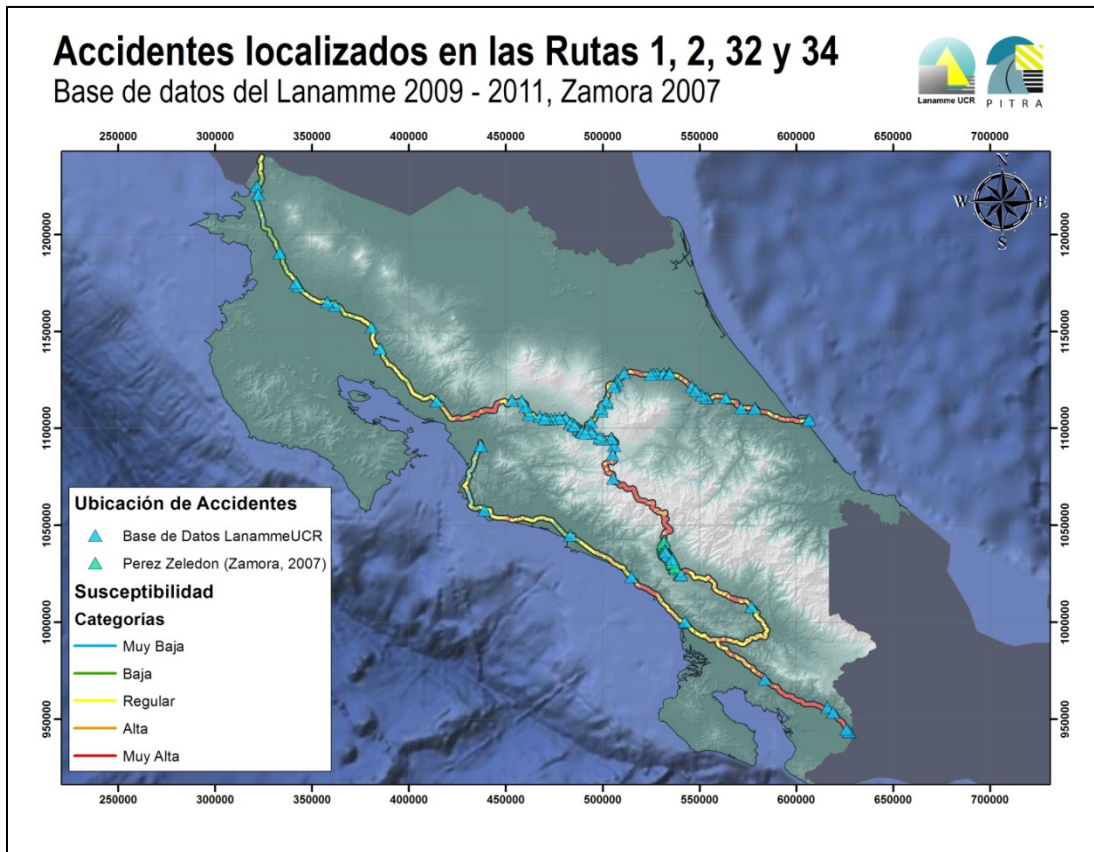


Figura 20: Base de Datos de Accidentes ubicados en las rutas de análisis



Figura 21: Puntos de Análisis

Luego de considerar esta limitación, se utilizó la información combinada de accidentes/susceptibilidad se eligieron 4 puntos de análisis, para estos puntos se empleo el equipo de auscultación visual Geo 3D mencionado en el apartado 2.7.1 del documento, los puntos se analizaron empleando las listas de chequeo para la realización de auditorías de seguridad vial tal como se describió en el apartado 2.7 de este informe. Los puntos de análisis se muestran en la Figura .

Estos puntos constituyen tramos críticos, donde la susceptibilidad es alta y la concentración de accidentes es significativa. El análisis mediante las listas de chequeo de auditorías de seguridad vial constituye un diagnóstico detallado de elementos de la vía que pueden ser corregidos por la Administración. El uso del equipo de auscultación visual Geo 3D, permitió recopilar la información con el nivel de detalle requerido mediante imágenes georreferenciadas de alta resolución, que permiten realizar las evaluaciones en oficina con altos niveles de precisión y eficiencia

4. CONCLUSIONES

La metodología utilizada en este estudio permite identificar secciones de los principales corredores del país con distintos niveles de vulnerabilidad para el usuario ante eventos que propicien un accidente. Los resultados obtenidos permiten, de forma objetiva y científica, identificar tramos de las vías donde los encargados de realizar la gestión vial pueden realizar intervenciones de forma oportuna con la posibilidad de lograr un impacto significativo en la reducción del riesgo de accidentes relacionados con la convergencia de los factores estudiados.

Las evaluaciones por medio de las “listas de chequeo para auditorías de seguridad vial” evidencian que en muchos de los puntos donde se detectaron condiciones de alta vulnerabilidad para los usuarios, es necesaria la ejecución de intervenciones para corregir aspectos adicionales, tales como anchos de carril, señalización vertical e Iluminación, barreras de contención y zonas de despeje lateral, entre otros; elementos que al no presentar las condiciones mínimas de funcionalidad aumentan aún más el riesgo de accidentes.

Un 61% de la longitud de las rutas evaluadas presentan condiciones entre alta y muy alta vulnerabilidad para el usuario de sufrir accidentes, considerando el aporte de los distintos parámetros evaluados, es decir, clima, terreno, retroreflectividad de pinturas y resistencia al deslizamiento de las vías.

La evaluación revela una condición de alto riesgo en relación con la capacidad de frenado de los vehículos bajo condiciones de lluvia, poniendo en evidencia la necesidad de utilizar mezclas asfálticas con menor propensión al desgaste y con menor presencia de materiales con componentes calizos.

5. RECOMENDACIONES

Los valores utilizados en esta investigación como factores de superposición asociados al riesgo (Tablas 1,2, 9 y 10), deben ser objeto de validación ya que son valores fijados a partir de las consideraciones particulares de la Red Vial de Costa Rica, por lo que pueden ser modificados acorde a las condiciones presentes en las vías donde se aplique la metodología.

Es necesario completar una base de datos de accidentalidad representativa, con mayor cantidad de información sobre los tipos de incidentes para poder determinar correlaciones más precisas con los resultados obtenidos en este estudio a partir del perfil de susceptibilidad según el tipo de accidente y sus consecuencias.

En este tipo de análisis pueden ser incluidos otros parámetros o indicadores de la seguridad vial, como por ejemplo la presencia de sistemas de contención lateral, ancho del espaldón, etc, que sean representativos en los análisis de tramos de concentración de accidentes.

6. BIBLIOGRAFÍA

AASHTO. (2010). *Highway Safety Manual* (Vol. I). North Capitol, Washington, E.E.U.U.: AASHTO.

Barrantes, J., & al, e. (1986). *Atlas Climatológico de Costa Rica*. San José, Costa Rica: Instituto Meteorológico Nacional.

Debaillon, C., Carlson, P., He, Y., Schnell, T., & Aktan, F. (2007). *Updates to Research on Recommended Minimum Levels for Pavement Marking Retroreflectivity to Meet Driver Night Visibility Needs*. U.S.A.: Federal Highway Administration.

Dourthé, A., & Salamanca, J. (2003). *Guía Para Realizar una Auditoría de Seguridad Vial*. Providencia, Santiago, Chile: CONASET.

Solano, J., & Villalobos, R. (2000). *Aspectos fisiográficos aplicados a un bosquejo de regionalización geográfico climático de Costa Rica*. San José, Costa Rica: Instituto Meteorológico Nacional.

Zamora, J. (2007). *Análisis de ocurrencia de diferentes tipos de accidentes viales y seguridad vial en el cantón de Pérez Zeledón*. Montes de Oca, San Jose, Costa Rica: Universidad de Costa Rica.

