

INFORME FINAL

PROYECTO: LM-PI-USVT-004-14

EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE
SISTEMAS DE DEMARCACIÓN VIAL
HORIZONTAL EN COSTA RICA A
TRAVÉS DEL PARÁMETRO DE
RETROREFLEXIÓN

PROGRAMA DE INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORTE



INFORME FINAL

PROYECTO: LM-PI-USVT-004-14

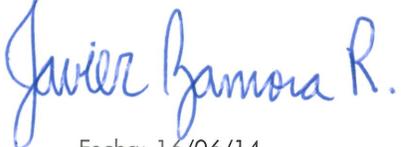
EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE
SISTEMAS DE DEMARCACIÓN VIAL
HORIZONTAL EN COSTA RICA A
TRAVÉS DEL PARÁMETRO DE
RETROREFLEXIÓN

Preparado por:

Unidad de Seguridad Vial y Transporte

San José, Costa Rica
Junio, 2014

INFORMACIÓN TÉCNICA DEL DOCUMENTO

1. Informe Final: LM-PI-USVT-004-14	2. Copia No.: 1	
3. Título y subtítulo: Evaluación del desempeño de sistemas de demarcación vial horizontal en Costa Rica a través del parámetro de retrorreflexión	4. Fecha del Informe: Junio, 2014	
5. Organización y dirección: Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, Universidad de Costa Rica, Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, San Pedro de Montes de Oca, Costa Rica Tel: (506) 2511-2500 / Fax: (506) 2511-4440	6. Encargado de Publicación: Ing. Diana Jiménez Romero, MSc, MBA	7. Diagramación: Ana Gómez
8. Notas complementarias: Este documento abarca la primera fase del proyecto de evaluación del desempeño de sistemas de demarcación vial horizontal en Costa Rica, a través del análisis del parámetro de retrorreflexión.		
9. Resumen <i>En Costa Rica, tradicionalmente se utilizaba la pintura base solvente (alquídica) para la demarcación vial. Posteriormente se introdujo la pintura base agua (alquídica), la cual ha tenido en muchos países un alto desempeño y se prefiere por sus contenidos no contaminantes, tanto para el ambiente como para las personas que la manipulan. En años recientes se introdujo al país el material termoplástico, el cual se aplica en caliente y es de alto desempeño (bajo ciertas condiciones). Con este proyecto de investigación, el PITRA-LanammeUCR a través de su Unidad de Seguridad Vial y Transporte, busca generar conocimiento en el desempeño real de estas tres tecnologías de demarcación vial en Costa Rica y el comportamiento de los materiales en sí, principalmente a través del parámetro de la retrorreflexión. Los resultados de esta investigación servirán de apoyo al trabajo que desde el año 2011 ha venido haciendo el Comité de Pinturas CTN-11 de INTECO, integrado por miembros del MOPT, del LanammeUCR, de los fabricantes de materiales de demarcación vial y de las empresas demarcadoras. El proyecto se realiza en varias fases. Como un primer acercamiento al tema de la durabilidad de los materiales de demarcación vial en Costa Rica, en el año 2012 se comenzó con 2 rutas nacionales y una ruta de travesía, demarcadas con pintura base agua, pintura base solvente y material termoplástico, en color blanco y amarillo. Las mediciones se llevaron a cabo con dos retrorreflectómetros, uno manual y uno móvil. Se llevaron a cabo comparaciones entre mediciones con diferentes equipos, materiales y colores. En las siguientes fases del proyecto se incluirán rutas en varias partes del país, y se analizarán otros factores, tales como el factor climático, los volúmenes vehiculares, el tránsito de vehículos pesados, los anchos de carril, y todo el proceso de demarcación vial.</i>		
10. Palabras clave Demarcación vial, desempeño, seguridad vial, retrorreflexión	11. Nivel de seguridad Ninguno	12. Núm. de páginas 99
13. Preparado por: Ing. Javier Zamora Rojas, MScE Investigador- Unidad de Seguridad Vial y Transporte (PITRA)  Fecha: 16/06/14	Colaboradora: Silvia Barrantes Quirós Asistente de Ingeniería Civil Unidad de Seguridad Vial y Transporte - PITRA Fecha: 16/06/14	14. Revisado por: Ing. Diana Jiménez Romero, MSc, MBA Coordinadora Unidad de Seguridad Vial y Transporte (PITRA)  Fecha: 16/06/14
Revisado por: Ing. Erick Acosta Hernández Investigador- Unidad de Seguridad Vial y Transporte (PITRA)  Fecha: 16/06/14	Revisado por:	15. Aprobado por: Ing. Guillermo Loría Salazar, MSc Coordinador General PITRA  Fecha: 16/06/14

1. INTRODUCCIÓN	01
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	02
3. OBJETIVO GENERAL	03
4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	03
5. IMPORTANCIA DEL ESTUDIO	04
6. ANTECEDENTES	05
7. MARCO TEÓRICO	07
7.1 SISTEMA DE DEMARCACIÓN VIAL HORIZONTAL.....	07
7.2 RETRORREFLEXIÓN.....	07
7.3 FACTORES INFLUYENTES EN LA DEMARCACIÓN VIAL HORIZONTAL.....	10
7.4 LA RETRORREFLEXIÓN: EXPERIENCIA INTERNACIONAL.....	16
8. METODOLOGÍA	30
8.1 ELECCIÓN DE RUTAS Y SUS CARACTERÍSTICAS.....	30
8.2 EQUIPOS DE MEDICIÓN DE RETRORREFLEXIÓN.....	34
8.3 DISEÑO EXPERIMENTAL Y PROCEDIMIENTO DE MUESTREO.....	35
8.4 ALCANCE Y LIMITACIONES.....	36
9.RESULTADOS Y ANÁLISIS	38
9.1 DATOS DEL RETRORREFLECTÓMETRO MANUAL.....	38
9.2 DATOS DEL RETRORREFLECTÓMETRO MÓVIL.....	39
9.3 EVALUACIÓN DE LA RETRORREFLEXIÓN.....	42
9.4 ANÁLISIS DE LA RUTA DE TRAVESÍA LANAMMEUCR.....	43
9.5 ANÁLISIS DE LA RUTA 3 (HEREDIA - ALAJUELA).....	48
9.6 ANÁLISIS DE LA RUTA 110 (RADIAL ALAJUELITA).....	50
9.7 ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE RUTAS Y MATERIALES.....	52

9.8 MODELOS EMPÍRICOS DE RETRORREFLEXIÓN.....	55
10 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	59
10.1 CONCLUSIONES.....	59
10.2 RECOMENDACIONES.....	61
11 REFERENCIAS.....	63
ANEXO A: DATOS DE RETRORREFLEXIÓN RUTA DE PRUEBA LANAMMEUCR.....	66
ANEXO B: DATOS DE RETRORREFLEXIÓN RUTA 3.....	72
ANEXO C: DATOS DE RETRORREFLEXIÓN RUTA 110.....	79
ANEXO D: PRUEBA ESTADÍSTICA T.....	90

En Costa Rica, uno de los temas en el área de la seguridad vial de mayor interés a nivel nacional ha sido el de la durabilidad y desempeño de las pinturas y materiales para demarcación vial. Existe mucho desconocimiento sobre el efecto que tiene el estado del pavimento, el clima y el tránsito de nuestras carreteras en la durabilidad de las pinturas de tránsito. Una de las principales carencias en este tema es la falta de especificaciones de retrorreflexión para la demarcación vial horizontal, como principal parámetro de desempeño, así como una inspección más rigurosa cuando se están ejecutando los proyectos.

A partir del año 2011, se conformó el Comité CTN-11 de INTECO para la normalización de los ensayos de calidad de las pinturas de tránsito (base agua, base solvente y termoplástica), así como de las microesferas de vidrio. Este comité está integrado por miembros de diferentes sectores, incluyendo a la Administración, a INTECO, al LanammeUCR, a los fabricantes de pinturas, y a las empresas que se dedican a la demarcación vial; por lo que existe un gran interés de parte de todos los sectores en normalizar y generar especificaciones en este tema.

Durante los años 2012 y 2013, se demarcaron muchas vías nacionales con diferentes materiales, y se generaron cuestionamientos acerca del desempeño de los sistemas de demarcación vial. Es por ello que la Unidad de Seguridad Vial y Transporte del PITRA-LanammeUCR, apoyando la gestión de la Administración y la labor del Comité CTN-11, ha definido un proyecto de investigación en el tema de desempeño de los sistemas de demarcación vial horizontal, que sirva como insumo para poder generar conocimiento en este tema, y posteriormente ajustar las especificaciones técnicas de retrorreflexión horizontal que propuso inicialmente el Comité CTN-11. El proyecto será llevado a cabo en etapas, según la programación de proyectos de demarcación vial de CONAVI, de tal forma que se puedan evaluar las condiciones particulares de Costa Rica, en cuanto al estado de la red vial, el clima, el tránsito y demás factores influyentes.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En materia de seguridad vial, Costa Rica carece de especificaciones técnicas en muchas áreas, lo cual no permite generar los mecanismos adecuados para la planificación, diseño y evaluación de proyectos. Este panorama ha comenzado a cambiar en los últimos años, y existe actualmente una mayor conciencia sobre la necesidad de generar especificaciones técnicas en cuanto a diferentes temas de la ingeniería de la seguridad vial, siendo la demarcación vial horizontal uno de los aspectos de mayor importancia. Una adecuada demarcación vial debe ser clara y debe orientar a los conductores en sus diversas maniobras. Las condiciones topográficas y climatológicas de nuestro país realzan la necesidad de contar con vías adecuadamente demarcadas, con materiales de alta calidad y durabilidad.

Desde hace ya muchos años, se han suscitado cuestionamientos en Costa Rica con respecto al tema de la demarcación vial, ya que se ha evidenciado que los materiales no duran lo que se espera. El resultado es una red vial heterogénea en cuanto a la demarcación vial se refiere; es decir, vías con buena demarcación, otras con demarcación muy desgastada, o en el peor de los casos, totalmente inexistente.

En demarcación vial, muchos materiales son utilizados actualmente, desde la tradicional pintura base solvente (alquídica) hasta materiales más recientes en nuestro país, como lo es el material termoplástico. A pesar de la experiencia de muchos países en el uso de estos materiales, poco se conoce en Costa Rica sobre el desempeño de diferentes tipos de materiales bajo diferentes condiciones de clima, de tránsito, estado de la superficie, entre otros factores.

El objetivo de esta investigación es analizar, a partir de mediciones de retrorreflexión horizontal, el desempeño de diferentes sistemas de demarcación vial horizontal en dos rutas nacionales y una ruta de travesía, que permita generar conocimiento sobre la durabilidad de los materiales ante diversas condiciones de clima, tránsito vehicular y estado de la superficie de rodamiento.

4. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudiar el desempeño y durabilidad de demarcación horizontal con pintura base agua amarilla en una ruta de travesía de bajo tránsito, a partir de mediciones de retrorreflexión con equipo manual y móvil.
- Estudiar el desempeño y durabilidad de demarcación horizontal con pintura base solvente amarilla y blanca en una ruta nacional de tránsito medio y alto, a partir de mediciones de retrorreflexión con equipo manual.
- Estudiar el desempeño y durabilidad de demarcación horizontal con material termoplástico de color amarillo y blanco en una ruta nacional de tránsito medio y alto, a partir de mediciones de retrorreflexión con equipo manual.
- Analizar las diferencias entre las mediciones de retrorreflexión con equipo manual y móvil en la ruta analizada con ambos equipos.
- Analizar los resultados de retrorreflexión entre los diferentes materiales de demarcación vial considerando las diferencias de color (blanco y amarillo) y el tipo de señal (línea o figura), relacionándolo descriptivamente con el tránsito (TPD).

5. IMPORTANCIA DEL ESTUDIO

Este proyecto de investigación forma parte de las investigaciones que el Pitra-LanammeUCR está realizando en diversos temas del área vial, como parte de su Plan Quinquenal 2013-2017, con el fin de servir de insumo para la elaboración de especificaciones técnicas para el país. El resultado de este estudio complementará la labor que está llevando a cabo el Comité CTN-11, y será información valiosa para la Administración para mejorar sus carteles de licitación en sus proyectos de demarcación vial y para ejercer el control de calidad adecuadamente.

Este conocimiento irá en beneficio de todos los usuarios de la vía, al poder contar con una red vial adecuadamente demarcada, mejorando así las condiciones de seguridad vial. Estos resultados serán igualmente beneficiosos para que la Administración haga un uso óptimo de los recursos asignados a las labores de demarcación vial. Finalmente, se espera que este conocimiento sea también valioso para los proveedores y fabricantes de materiales de demarcación vial, así como para las empresas que realizan la demarcación vial en las carreteras.

Uno de los elementos de mayor relevancia en cuanto al nivel de seguridad vial que ofrece una carretera es la visibilidad de la demarcación horizontal, especialmente durante la noche. Dicho nivel de visibilidad es medido a través de la retrorreflectividad ofrecida por el sistema de demarcación vial que se utilice. A la fecha, no ha habido un conceso a nivel internacional sobre los niveles adecuados de retrorreflectividad que debe tener la demarcación; sin embargo, muchos países y estados han desarrollado especificaciones, y se ha convertido en un área de estudio para especialistas del área de la seguridad vial.

Un estudio realizado por el departamento de transportes de Washington (Kopf, 2004) sobre la demarcación vial incorporó un análisis de curvas de degradación de la retrorreflectividad, y determinó que el comportamiento de este parámetro a través del tiempo es impredecible y depende de muchos factores. Para la realización de este estudio se utilizó un equipo de medición de retrorreflexión (retrorreflectómetro) móvil de marca Laserlux, y se realizaron mediciones en demarcación con pinturas base solvente y base agua. Debido a que el equipo solo funciona en condiciones secas, el proceso de recolección de datos se realizó de marzo a setiembre del 2003, dadas las condiciones climáticas del lugar. Se seleccionaron 80 secciones de carretera ubicadas a lo largo de todo el estado de Washington, en las cuales se realizaron las mediciones que formaron parte del estudio. Se eligió un rango y se extrapolaron los datos para estimar la vida útil de las marcas del pavimento. Los resultados obtenidos revelaron gran variabilidad por lo que se decidió calibrar el Laserlux dejando condiciones como el clima y la velocidad del vehículo constantes; sin embargo, aún después de la calibración del equipo los datos presentaron variabilidad significativa, la cual se concluyó que se debe a las siguientes razones: a los cambios que se generan durante el proceso de aplicación por las diferentes cuadrillas de trabajo, la inherente variabilidad ofrecida por el equipo de medición utilizado, las dificultades en el proceso de medición, las diferentes condiciones ambientales presentes en las diferentes giras de medición que se realizaron, la profundidad a la que se encuentran las microesferas en los diferentes puntos de medición, o que simplemente la retrorreflectividad puede ser inconsistente (Kopf, 2004).

Por otra parte, en la revista del Instituto de Ingenieros en Transporte ITE (Sarasua, Davis, Robertson & Johnson, 2013) se publicó un artículo llamado “Una metodología para la evaluación de las demarcaciones de líneas de centro en climas templados”, donde el objetivo de la investigación fue desarrollar, comparar y evaluar los modelos de degradación de las pinturas amarillas de línea de centro, tanto las de base agua como las de material termoplástico, para así determinar que tan seguido se deben reemplazar las marcas del pavimento en las carreteras primarias y secundarias del estado de Carolina del Sur. La investigación mostró que las variables más significativas en los modelos son la cantidad de días transcurridos después de la aplicación y el ancho del espaldón. Además, se encontró que variables como el volumen de tráfico resultaron ser marginalmente significativas; es

decir, no es una variable significativa estadísticamente. Por otro lado, para el procesamiento y edición de datos, estos fueron introducidos en una base de datos exhaustiva y al revisar por anomalías, estas fueron atribuidas a las marcas que producen las llantas de los vehículos, raspado, exceso de humedad, abrasión física y suciedad del terreno, y al ser identificadas fueron eliminadas del análisis. En este proyecto se analizaron siete marcas de pintura amarilla termoplástica y dos marcas de pintura base agua de color amarillo.

En otros artículos del Departamento de Ingeniería de Carolina del Norte (Rasdorf, Hummer, Zhang & Sitzabee, 2009), Carolina del Sur (Robertson, Sarasua, Johnson & Davis, 2012) y de autores como Holzschuher et al. (2010), mantienen resultados similares a los antes mencionados. En ninguno de estos proyectos se logró determinar un modelo que describiera el comportamiento de la pintura retrorreflectiva a lo largo del tiempo; sin embargo, se tienen resultados importantes como los factores que intervienen en el deterioro de las pinturas, así como información acerca del desempeño de los equipos de medición utilizados y algunos procesos de calibración de estos.

Por su parte, Rasdorf et al. (2009) mencionan un modelo lineal de efectos mixtos LMEM, por sus siglas en inglés, el cual toma en cuenta la correlación a través de las mediciones repetidas de los datos, y generaron predicciones más precisas que otros métodos, pero aún no se considera un modelo exacto.

Tal como se mencionó en secciones anteriores, en Costa Rica no se ha documentado la experiencia en el campo de la demarcación vial de carreteras. En la práctica se han logrado corroborar aciertos y desaciertos en el uso de diferentes tecnologías de demarcación vial, y su desempeño se ha atribuido a las condiciones climáticas, al tránsito vehicular y al estado de la superficie de rodamiento, principalmente. La calidad de los materiales aplicados también ha sido un aspecto determinante a considerar; sin embargo, esto sí se ha podido verificar a través de pruebas de laboratorio, sobretodo en el caso de pinturas base agua, base solvente y las microesferas de vidrio. Aún están en proceso de desarrollo los ensayos para material termoplástico, el cual no se introdujo al país sino hasta hace pocos años.

La señalización vial es uno de los aspectos fundamentales en la ingeniería de la seguridad vial, ya que es un sistema que representa visualmente las leyes de tránsito en las vías públicas, con el fin de reglamentar, prevenir, guiar e informar a los conductores y demás usuarios de la vía. La demarcación vial horizontal y la señalización vertical se complementan y ambas deben estar presentes coherentemente; una no sustituye a la otra.

En esta sección se introducirá el tema de los sistemas de demarcación vial, sus componentes, y su principal parámetro de desempeño: la retrorreflexión. Hay factores propios de la demarcación vial que inciden en su desempeño y durabilidad, tal como la calidad de los materiales y el proceso de ejecución de obra, incluyendo la preparación de la superficie, la técnica y equipos de aplicación de los materiales, los tiempos de secado, entre otros. También se expondrá la base teórica entorno a los principales factores externos que inciden en el desempeño de la demarcación vial en Costa Rica, tales como el clima, el tránsito, y el estado de la superficie de rodamiento.

7.1 SISTEMA DE DEMARCACIÓN VIAL HORIZONTAL

Se le llama sistema de demarcación vial al estar conformado por más de un componente. Un sistema simple de demarcación vial consiste en un material de base, el cual puede ser pintura (base solvente o base agua), termoplástico, cintas preformadas, plástico en frío, entre otros tipos, junto a las microesferas de vidrio, las cuales proveen al sistema de visibilidad nocturna. El material por sí solo no es retrorreflexivo; es decir, no es visible en condición nocturna y, por otra parte, las microesferas de vidrio requieren de un medio para adherirse y poder reflejar la luz que incide en ellas hacia la dirección deseada.

De forma complementaria al sistema de demarcación vial se encuentran los captaluces, u ojos de gato, los cuales son de gran importancia en Costa Rica dadas sus condiciones climáticas y topográficas. Bajo fuertes lluvias, el agua se acumula sobre la superficie de rodamiento y, en muchos casos, cubre la demarcación vial, reduciendo o eliminando el efecto de retrorreflexión. En estos casos los captaluces son esenciales para guiar al conductor, y aún más en carreteras con fuertes pendientes y curvas horizontales.

7.2 RETRORREFLEXIÓN

La medida del desempeño más adecuada de cualquier sistema de demarcación vial es la retrorreflexión o retrorreflectividad, la cual es una medición de la cantidad de luz que es reflejada de vuelta a los ojos del conductor en el momento en que las marcas viales son iluminadas por las luces del vehículo.

Para medir la retroreflexión existen distintos equipos que simulan las condiciones a las que un conductor visualiza la demarcación vial en la noche. Existe un ángulo en el que las marcas viales son iluminadas por el vehículo y un ángulo de observación, que corresponde a la visual del usuario (ver Figura 7.1).

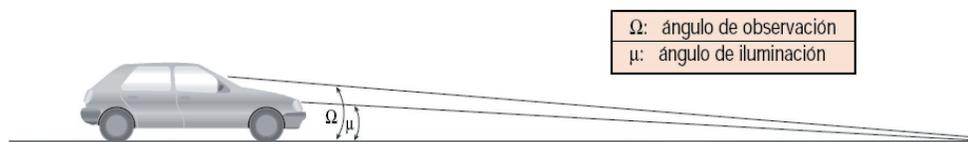


Figura 7.1

Ángulos de iluminación y observación.

Nota: Tomado de MTT, 2001.

Con base en los ángulos de iluminación y observación, se establecen valores mínimos de retroreflexión que debe cumplir la demarcación vial horizontal, para ser visible en la noche.

El siguiente cuadro muestra valores de referencia de retroreflexión inicial y a los 6 meses, según el Departamento de Transportes de la Florida (FDOT, 2010) y la AEN/CTN 135 (2007), para demarcación de color blanco y amarillo.

Tabla 7.1. Especificaciones de retroreflexión de demarcación vial inicial y a los 6 meses para pintura blanca y amarilla, en la Florida y España.

	Blanca (mcd/m ² /lx)	Amarilla (mcd/m ² /lx)	Fuente
Inicial	300	250	FDOT, 2010
A los 6 meses	150	150	
Inicial	300	150	AEN/CTN 135, 2007
A los 6 meses	200	150	

Se presentan también los valores de retroreflexión mínimos establecidos en el Manual de Señalización de Tránsito de Chile (MTT, 2001), los cuales son más permisivos que los del estado de la Florida, y de la (AEN/CTN 135, 2007).

Tabla 7.2. Especificaciones de retroreflexión, según el ángulo de iluminación y observación para demarcación de color blanco y amarillo, en Chile

Niveles mínimos de retroreflexión (mcd/m ² /lx)				Fuente: Manual de Señalización de Tránsito: Demarcaciones (MTT, 2001)
Ángulos		Colores		
Iluminación	Observación	Blanco	Amarillo	
3,5°	4,5°	120	95	
1,24°	2,29°	90	70	

En el caso de España, se establecen los siguientes valores mínimos de retrorreflexión:

Tabla 7.3. Especificaciones de retrorreflexión en España.

Tipo de demarcación	Coeficiente de retrorreflexión (RL) (mcd/m ² /lx)		
	30 días	180 días	730 días
Blanco (permanente)	300	200	100
Amarillo (temporal)	150		

Nota: Tomado de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes, Ministerio de Obras Públicas de España, 1999.

INTECO, a través de su comité CTN-11 Pinturas, publicó en los años 2012 y 2013 las siguientes normas para Costa Rica:

- INTE 11-02-01:2012 Parte I: Pintura base agua para señalamiento horizontal
- INTE 11-02-01:2012 Parte II: Pintura base solvente para señalamiento horizontal
- INTE 11-02-01:2012 Parte III: Material termoplástico blanco y amarillo (forma sólida)
- INTE 11-02-02:2012: Microesferas de vidrio utilizadas en pinturas de tráfico
- INTE 11-02-03:2013: Guía de buenas prácticas para la demarcación vial horizontal

En la norma INTE 11-02-03:2013 se muestran los requisitos de retrorreflectividad inicial para las pinturas base agua y base solvente, tanto para color amarillo como blanco. Los valores que se incluyen en el Cuadro 7.4 corresponden a valores de RL; es decir, el índice de retrorreflexión en condición nocturna y sobre superficie seca.

Tabla 7.4. Requisitos de retrorreflectividad inicial para Costa Rica.

Tipo de pintura para demarcación vial	Color	
	Blanco (mcd/m ² /lx)	Amarillo (mcd/m ² /lx)
Base agua	200	150
Base solvente	200	150

Nota: Tomado de INTECO, 2013.

En el caso del material termoplástico, en la norma INTE 11-02-01:2012 adicionalmente se incluyeron valores de retrorreflectividad mínima a los 180 días después de su instalación. Esto se debe a que este material cuenta con microesferas de vidrio retrorreflectivas premezcladas, a diferencia de las pinturas base agua y base solvente a las cuales únicamente se le agregan las microesferas de tipo "drop-on" (colocadas in situ por efecto de gravedad, ya sea por medio automatizado o a mano). Al material termoplástico también se le agregan in situ microesferas de tipo "drop-on" (adicionales). Por lo tanto, los valores de retrorreflexión para este material se muestran en el siguiente cuadro:

Tabla 7.5. Requisitos de retrorreflexividad para material termoplástico para Costa Rica.

Retrorreflexión para material termoplástico	Color	
	Blanco (mcd/m ² /lx)	Amarillo (mcd/m ² /lx)
Valores mínimos iniciales	400	300
Valores mínimos a 180 días	325	200

Nota: Tomado de INTECO, 2013.

7.3 FACTORES INFLUYENTES EN LA DEMARCACIÓN VIAL HORIZONTAL

Son muchos los factores que inciden en el desempeño final de la demarcación vial; algunos tienen que ver con el proceso de demarcación vial como tal, y otros son aspectos externos, pero igualmente influyentes. En el proceso de demarcación influye el tipo y calidad de los materiales a utilizar, la preparación de la superficie previo a la demarcación, la maquinaria y equipos a utilizar, y la inspección y control de calidad antes, durante y después de la demarcación. Dentro de los factores externos están: el estado del pavimento, la sección transversal, las condiciones ambientales y climáticas, y el tipo y volúmenes de tránsito.

En el reporte de asesoría técnica del LanammeUCR LMAT2908 (LanammeUCR, 2008) se resumieron los principales factores en la Figura 7.2.

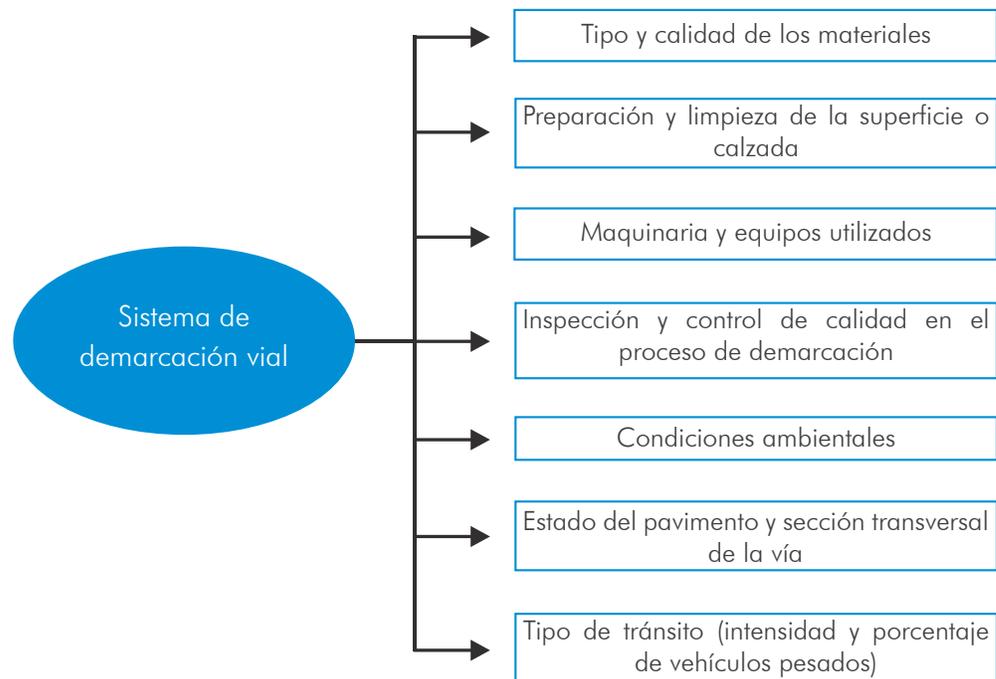


Figura 7.2

Principales factores que inciden en el desempeño de la demarcación vial.

Nota: Tomado del reporte técnico LM-AT-29-08 del LanammeUCR, 2008.

Tipo y calidad de los materiales de demarcación

El tipo de material a utilizar es un factor fundamental en la calidad y desempeño de la demarcación vial. El tipo de material debe ser escogido adecuadamente según diversos criterios: técnica de aplicación y desempeño del material, tipo y estado de la superficie de rodamiento, condiciones climáticas, tipo de tránsito, y también su costo económico.

Como ejemplo se toma la pintura acrílica base agua, y se muestran en el cuadro siguiente las ventajas y desventajas de su uso. De igual forma cada material presenta sus características propias y sus ambientes propicios para su utilización.

Tabla 7.6. Ventajas y desventajas de la pintura acrílica base agua.

Ventajas	Desventajas
-Puede tener un tiempo de secado rápido, especialmente bajo condiciones ambientales adecuadas: día soleado, temperatura no menor de 21 °C, baja humedad, y presencia de brisa.	-Muy sensible a la temperatura (almacenamiento).
-Puede ser aplicada a una tasa de colocación más rápida.	-Muy sensible a la humedad alta, la cual puede incrementar drásticamente el tiempo de secado.
-No se requieren solventes para limpiarla.	-Es el tipo de demarcación de menor duración.
	-No se recomienda para vías de alto tráfico.
	-Reacciona con los metales, excepto con acero inoxidable.

Nota: Tomado de "Pavement Marking Student Manual", USDOT, 2001.

En cuando a los materiales como tal, en la sección 7.2 se citaron las normas INTECO que deben seguirse para asegurar su calidad. En estas normas se indican las pruebas de laboratorio para cada uno de los diferentes materiales, siguiendo los métodos de ensayo de la ASTM de los Estados Unidos.

Preparación y limpieza de la superficie o calzada

Con el fin de poder mejorar la adherencia de la pintura o del material, es indispensable limpiar adecuadamente la superficie donde se va a demarcar; para lo cual se pueden utilizar barredoras, agua a presión, o con aire presurizado, según se indica en la norma INTE 110203:2013 Guía de buenas prácticas para la demarcación vial horizontal (INTECO, 2013). Se debe garantizar que la superficie quede libre de maleza, grasa, piedra suelta o cualquier otra partícula o elemento que afecte la adherencia (INTECO, 2013).

En cuanto a la demarcación existente que pueda causar confusión a los usuarios de la vía, esta deberá ser removida mediante el esmerilado o cualquier otro método abrasivo (INTECO, 2013).

Maquinaria y equipos utilizados

Existen diversos equipos para la instalación de marcas viales. Por ejemplo, para la pintura base agua y base solvente, hay equipos que trabajan con aire y otros sin aire. El equipo que atomiza la

pintura sin incluir aire en el sistema es más adecuado ya que hay menos desperdicio de pintura y la calidad del trabajo es mejor. Además, hay que considerar que hay materiales de demarcación, tal como la pintura acrílica, que reaccionan con ciertos metales, por lo que el sistema debe ser de acero inoxidable. También hay otros aspectos importantes a considerar, tal como el diámetro de las mangueras y el tipo de boquilla y pistola.

Inspección y control de calidad en el proceso de demarcación

La labor de inspección es fundamental en los proyectos de demarcación vial con el fin de asegurar una calidad adecuada. Por ejemplo, se debe verificar la calidad de la pintura (pura o disuelta, en caso que aplique), la limpieza adecuada de la superficie, el uso del equipo adecuado para el tipo de material a aplicar, el espesor de pintura o material colocado, la dosificación de las microesferas retrorreflectivas de vidrio, el estado del pavimento, las condiciones climáticas, la humedad y la temperatura, la señalización temporal en el área de trabajo, entre otros aspectos.

En la norma INTE 110203:2013 Guía de buenas prácticas para la demarcación vial horizontal se detalla el proceso de inspección, ANTES, DURANTE y DESPUÉS de la aplicación (INTECO, 2013), incluyendo las subsecciones: condiciones climáticas, condiciones del pavimento, preparación de la superficie, predemarcación, materiales y equipos para la demarcación, tramo de prueba, salud y seguridad ocupacional, inspección de los materiales, espesores, dimensiones, color, microesferas de vidrio, inspección visual, limpieza final de la zona de trabajo, tiempo para la apertura al tránsito y retrorreflectividad.

Condiciones ambientales

En cuanto al factor del clima, Orozco (2007) en su trabajo final de graduación Zonificación climática de Costa Rica para la gestión de la infraestructura vial, afirma que:

"El clima afecta de forma negativa la visión de los conductores y la posibilidad de realizar sus maniobras, principalmente en la condición nocturna. La neblina, las lluvias excesivas, e incluso el fuerte viento pueden afectar a la conducción de los usuarios de la vía. La lluvia, por ejemplo, afecta sustancialmente el valor de la fricción entre los neumáticos y la carretera promoviendo los derrapes y dificultando las maniobras de frenado.

De esta forma, es imprescindible que en rutas que posean estas condiciones se tenga una adecuada señalización principalmente de carácter preventivo que le permita a los conductores conocer el estado de las rutas y conducir adecuadamente informados de la situación del medio ambiente que envuelve a estas. Además, es indispensable en zonas con problemas de neblina una adecuada señalización horizontal (tanto la línea centro como las líneas de borde), además de reflectores en la calzada que permitan tener claro la posición de los carriles y de la vía en general, tomando aún más en consideración que las condiciones climáticas descritas aquí se dan principalmente en rutas de montaña, lo cual ocasiona accidentes aún más graves." (pág.87-88)

Entre las condiciones climáticas críticas en Costa Rica se encuentran los altos niveles de humedad y de precipitación. La humedad afecta significativamente el proceso de demarcación vial, mayormente la adherencia de los materiales a la superficie de rodamiento y, por ende, el desempeño de dicha

demarcación. Las lluvias por su parte afectan toda la estructura del pavimento, incluyendo la demarcación vial. La Figura 7.1 muestra un mapa de precipitación media anual, con datos tomados del Atlas Climático de Costa Rica del año 1986. La Figura 7.3 muestra la zonificación climática que realizó Erick Orozco en el año 2007 para Costa Rica.

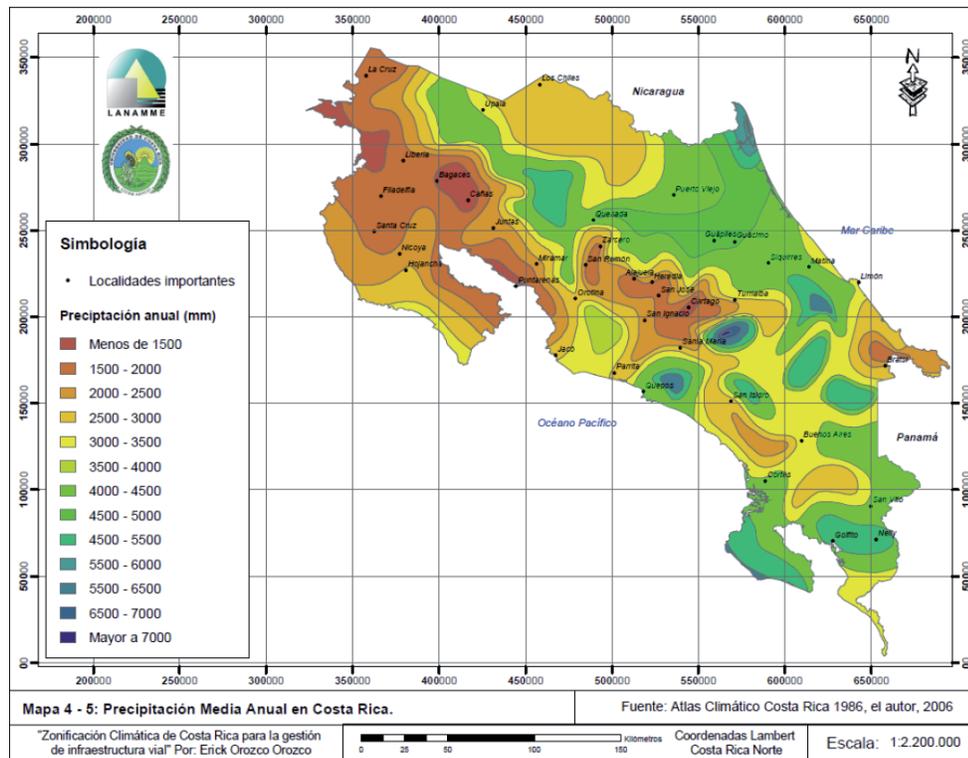


Figura 7.3

Mapa de precipitación media anual en Costa Rica.

Nota: Tomado de Orozco, 2007.

A partir de una extensa revisión bibliográfica y de fuentes de datos, Orozco realizó una zonificación climática para Costa Rica de aplicación a las obras viales. Para ello tomó como base la clasificación climática de Köppen, la clasificación mediante zonas de vida de Holdridge, la clasificación climática de Wilberth Herrera, las cuencas hidrográficas de Costa Rica, y la zonificación climática de Solano y Villalobos (Instituto Meteorológico Nacional). Además, Orozco exploró el uso del suelo, las zonas con desarrollo actual, la densidad vial del país y el potencial desarrollo de infraestructura vial. Finalmente, la zonificación propuesta por Orozco se muestra en las figuras 7.4 y 7.5, que corresponden al mapa de zonificación como tal y las variables pluviométricas promedio asociadas a cada región, respectivamente.

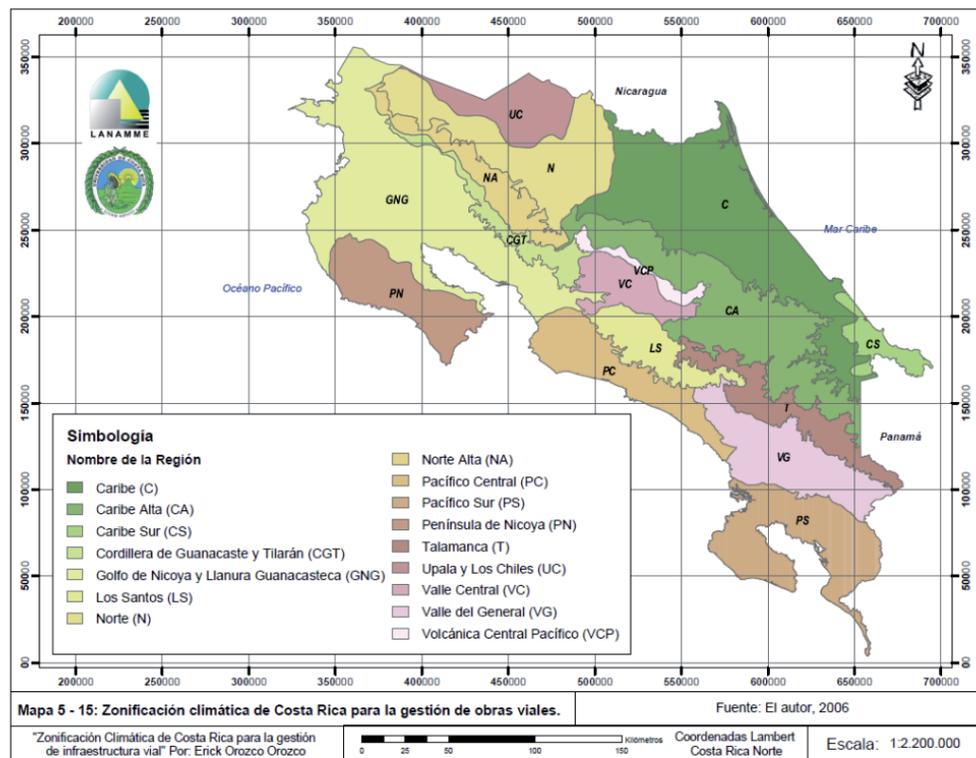


Figura 7.4

Mapa de precipitación media anual en Costa Rica. Nota: Tomado de Orozco, 2007.

Región	Símbolo	Precipitación promedio anual (mm)	Número de meses secos	Días de lluvia en el año
Caribe	C	4093	1 o menos	211
Caribe Alta	CA	3768	1o menos	224
Caribe Sur	CS	2492	Entre 2 y 3	166
Cordillera de Guanacaste y Tilarán	CGT	2660	4	172
Golfo de Nicoya y Llanura Guanacasteca	GNG	1911	Más de 5	108
Los Santos	LS	2986	Más de 3	171
Norte	N	3412	2 o menos	210
Norte Alta	NA	3404	Entre 1 y 2	218
Pacífico Central	PC	3410	Entre 2 y 3	157
Pacífico Sur	PS	4148	Entre 2 y 3	200
Península de Nicoya	PN	2471	5 o menos	106
Talamanca	T	3526	Entre 1 y 3	213
Upala y Los Chiles	UC	3065	Más de 3	199
Valle Central	VC	2223	Más de 4	140
Valle del General	VG	3186	Más de 3	187
Volcánica Central Pacífico	VCP	2632	Más de 3	168

Figura 7.5

Cuadro de variables pluviométricas promedio para Costa Rica. Nota: Tomado de Orozco, 2007.

Se presenta también en la Figura 7.6 los promedios de precipitación anual y días de lluvia en las distintas regiones, las cuales son variables que influyen directamente en el desempeño de la demarcación vial horizontal.

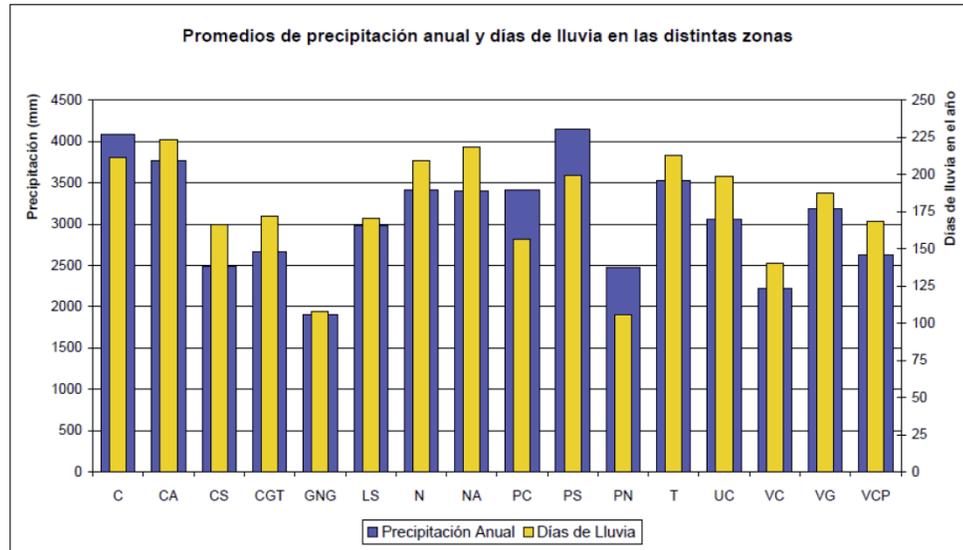


Figura 7.6

Gráfico de promedios de precipitación anual y días de lluvia en Costa Rica.
Nota: Tomado de Orozco, 2007.

Tal como se mencionó en la sección anterior sobre la inspección en el proceso de demarcación vial, no solo es importante escoger el tipo de material a utilizar según las características propias de la zona, sino que las condiciones climáticas deben ser monitoreadas antes, durante y después de la demarcación vial, para mejorar así la adherencia y durabilidad de los trabajos.

Estado del pavimento y sección transversal de la vía

La superficie de rodamiento donde vaya a ser colocada la demarcación es un factor muy importante a considerar antes de decidir el tipo de materiales para un determinado proyecto. El comportamiento y durabilidad de la demarcación no será igual en una superficie de pavimento recién colocada o en un muy buen estado, que en una superficie deteriorada y con irregularidades. Para ello la norma INTE 110203:2013 Guía de buenas prácticas para la demarcación vial horizontal recomienda que se hagan tramos de prueba, con el fin de prever cualquier problema de adherencia con los materiales escogidos (INTECO, 2013). Este tramo de prueba servirá además para realizar cualquier ajuste en el espesor aplicado, ya que si el pavimento es muy poroso deberá aplicarse una capa de pintura mayor, considerando que una parte va a ser absorbida por la superficie. En el caso del material termoplástico, por la experiencia internacional se recomienda utilizarlo en superficies de pavimento nuevas o en muy buen estado, ya que es un material cuya durabilidad se ha probado ser mayor, además de que su costo también es más elevado.

Tipo de tránsito: intensidad y porcentaje de vehículos pesados

El tráfico vehicular y el paso de vehículos pesados por una carretera también influye en el tipo de material que se escoja para realizar la demarcación vial. Es fácil constatar que a un mayor Tránsito Promedio Diario (TPD) y a un mayor porcentaje de vehículos pesados la demarcación vial tendrá una durabilidad menor que en una vía de poco tránsito. Por ello, conociendo esta información se puede realizar una escogencia adecuada para una condición particular.

En otros países se han desarrollado guías para homogenizar el uso de ciertos materiales bajo condiciones particulares de tránsito. Un ejemplo se muestra en el Cuadro 7.7, en el cual se recomienda el uso de varias tecnologías según las características del tránsito y de los años de servicio que le quedan al pavimento. Es decir, entre más años de servicio le queden al pavimento se debería utilizar un material de mayor resistencia al desgaste. Por ejemplo, se observa que la pintura base agua no se recomienda para vías con TPD mayor a 10 000 vehículos, ni para rutas con tráfico pesado.

Tabla 7.7. Materiales recomendados para demarcación horizontal en pavimentos de mezcla asfáltica caliente de acuerdo con el TPD.

Características del tránsito	Años de servicio que le quedan al pavimento		
	0-2	2-4	Más de 4
TPD < 1.000	Termoplástica Pintura base agua	Termoplástica Pintura base agua	Termoplástica Resinas epóxicas
1.000 < TPD < 10.000	Termoplástica Pintura base agua	Termoplástico Resinas epóxicas	Termoplástico Resinas epóxicas
TPD > 10.000	Termoplástica Resinas epóxicas	Termoplástica Resinas epóxicas	Termoplástico Resinas epóxicas
Tráfico pesado	Termoplástica Resinas epóxicas	Termoplástico Resinas epóxicas	Termoplástico Resinas epóxicas

Nota: Tomado de "Pavement Marking Handbook", Texas DOT, EE.UU., 2004.

7.4 LA RETRORREFLEXIÓN: EXPERIENCIA INTERNACIONAL

En esta sección se resumen algunos proyectos importantes que se han llevado a cabo en otros países en el tema del desempeño de la demarcación vial horizontal, basados en el parámetro de la retrorreflexión y en su relación con múltiples factores que afectan la durabilidad de los diferentes materiales.

En primer lugar se explica brevemente el diseño del experimento; es decir, materiales utilizados, colores, patrones o tipos de demarcación vial horizontal, tipo de vía, lugar, periodo de medición, etc. En segundo lugar se resume la forma en que se evaluó el experimento, en cuanto a la forma en que se llevaron a cabo las mediciones de retrorreflexión y demás parámetros, los equipos utilizados, etc. Finalmente, se resumen las principales conclusiones de cada uno de estos estudios y proyectos.

Tabla 7.8. Resumen del estudio de Thamizharasan, Sarasua y Clarke (2002).

Thamizharasan, Sarasua y Clarke (2002) Carolina del Sur, Estados Unidos	
<p>Diseño del experimento</p> <p>Esta publicación discute el desarrollo de una metodología que permitiera estimar el ciclo de vida de las marcas del pavimento basados en los niveles de retrorreflectividad.</p> <p>Esta metodología se desarrolló usando datos de campo de más de 150 lugares cuidadosamente seleccionados en la red vial interestatal de Carolina del Sur. Los datos fueron recolectados en el periodo de mayo 1999 a agosto 2001.</p>	<p>Evaluación del experimento</p> <p>Debido a deficiencias en los métodos de mantenimiento de la demarcación vial, se pretendió crear un sistema de evaluación de dichas marcas viales. Este sistema se alimentaría de modelos estadísticos que evaluarían la degradación de la retrorreflectividad de la demarcación vial existente.</p>
<p>Conclusiones:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Los factores más significativos en el desempeño de la demarcación del pavimento según el modelo obtenido incluyen: tipo de superficie del pavimento, material de la demarcación, color de la demarcación y actividades de mantenimiento. • Para una caracterización más precisa de los perfiles de degradación la demarcación se subdividió en categorías como material termoplástico sobre asfalto, material epóxico blanco sobre concreto, entre otras. • Se encontró que el TPD de la carretera no es una variable significativa en la degradación del material. 	

Tabla 7.9. Resumen del estudio de Aktan y Schnell (2004).

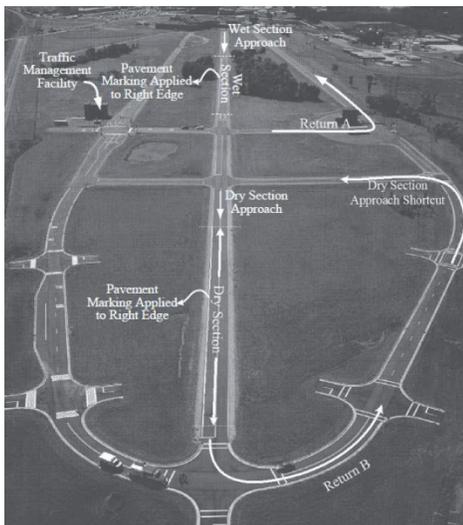
Aktan y Schnell (2004) Minnesota, Estados Unidos	
<p style="text-align: center;">Diseño del experimento</p> <p>Evaluar la visibilidad nocturna de tres tipos de marcas en el pavimento (una marca vial con microesferas de vidrio grandes y dos tipos de cinta preformada, una con microesferas de alto índice de refracción y otra con una mezcla de alto índice y normal). Evaluar en condiciones húmedas, secas y de lluvia simulada. El estudio fue llevado a cabo en octubre del 2002 en una carretera simulada (a nivel y en recta), en el Centro de Investigación en Transportes de 3M en Cottage Grove, Minnesota.</p>	 <p>The image is an aerial photograph of a simulated road layout. It shows a central road with two main sections: a 'Wet Section' at the top and a 'Dry Section' at the bottom. Each section has an 'Approach' area. On the right side of the road, there are 'Pavement Marking Applied to Right Edge' labels. There are also 'Return A' and 'Return B' paths indicated with arrows. A 'Traffic Management Facility' is visible on the left side. The road is surrounded by a grassy area and some buildings in the background.</p>
<p>Evaluación del experimento</p> <p>Las mediciones dependientes fueron demarcación del pavimento, distancia de detección y retrorreflectividad. Los participantes del experimento manejaron un vehículo experimental en secciones secas y húmedas, marcaron el punto en el que se dejaba de notar el final de la línea del lado derecho.</p>	
<p>Conclusiones:</p> <ul style="list-style-type: none"> • En términos de la distancia de detección, la cinta preformada con microesferas de alto índice tuvo un mejor desempeño ante las tres condiciones climáticas estudiadas. • Bajo condiciones húmedas y con lluvia los tres tipos de marcas obtuvieron resultados comparables. • Bajo condiciones secas, tanto la pintura como las marcas con microesferas grandes tuvieron los resultados más desfavorables. • La distancia de detección parece correlacionarse con la retrorreflectividad estándar únicamente si los datos de retrorreflectividad son obtenidos con el método correspondiente. 	

Tabla 7.10. Resumen del estudio de Kopf (2004).

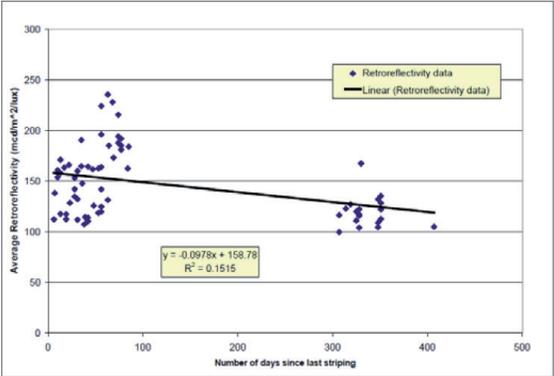
Kopf (2004)	Estado de Washington, Estados Unidos
<p>Diseño del experimento</p> <p>Desarrollar curvas de degradación de retrorreflectividad. Estas curvas serían usadas para conocer el desempeño de la demarcación a través del tiempo y así poder programar los trabajos de redemarcación vial.</p>	
<p>Evaluación del experimento</p> <p>Se utilizó un retrorreflectómetro móvil Laserlux para tomar las mediciones en aproximadamente 80 secciones a través del estado de Washington. Las medidas fueron tomadas entre julio del 2003 y julio del 2004 para pinturas base agua y base solvente. Se tomó como mínimo aceptable 100 mcd/m²/lux. La línea de mejor ajuste se extrapoló para determinar cuándo cada categoría de pintura caería por debajo del mínimo.</p>	
<p>Ejemplo de curva de degradación para pintura amarilla base agua con un tránsito promedio diario bajo menor a 7500 vpd.</p>	 <p>The figure is a scatter plot with a linear regression line. The y-axis is labeled 'Average Retroreflectivity (mcd/m²/lux)' and ranges from 0 to 300 in increments of 50. The x-axis is labeled 'Number of days since last striping' and ranges from 0 to 500 in increments of 100. The data points are represented by blue diamonds, showing a general downward trend. A black line represents the linear regression fit. A legend in the top right corner identifies the blue diamonds as 'Retroreflectivity data' and the black line as 'Linear (Retroreflectivity data)'. A text box in the bottom left of the plot area contains the equation $y = -0.0978x + 158.78$ and the coefficient of determination $R^2 = 0.1515$.</p>
<p>Conclusiones:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Los valores de retrorreflectividad de zonas con TPD similar resultaron con una variabilidad significativa, esto se puede atribuir a varios factores, como: la inherente variabilidad que produce el equipo de medición, la dificultad de calibrar el dispositivo, diferentes condiciones ambientales en los viajes de recolección de datos o simplemente que las mediciones de retrorreflectividad pueden ser inconsistentes. • Dada la variabilidad de los datos observados hasta la fecha, puede no ser posible, incluso con la recolección de más datos, crear predicciones en el desempeño de las demarcaciones del pavimento con niveles de confianza aceptables. 	

Tabla 7.11. Resumen del estudio de Tsyganov et al. (2006).

Tsyganov, Machemehl, Warrenchuck y Wang (2006) Texas, Estados Unidos	
Diseño del experimento	Evaluación del experimento
Las marcas del pavimento localizadas a la derecha del vehículo son detectadas más fácilmente y a distancias más lejanas por el conductor que las localizadas en el lado izquierdo. Debido a esto se inició la investigación para determinar la influencia de las líneas de borde en la seguridad de las carreteras.	Se realizaron investigaciones del efecto de las líneas de borde en el comportamiento del conductor, así como las reacciones que este toma, incluyendo los factores de navegación y posicionamiento, selección de la velocidad y el efecto de la percepción visual.
<p>Conclusiones:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Los estudios indicaron que los tratamientos de las líneas de borde impactaron de la siguiente manera: • Aumento de la velocidad, cerca de un 9% tanto en curvas como en tramos rectos. • Los vehículos presentaron una tendencia de movimiento hacia el borde del pavimento, tanto en la luz del día como en la noche. • Reducción de fluctuación del vehículo en la trayectoria de la línea de centro cerca de un 20%. • Reducción del esfuerzo mental del conductor. • Mejoramiento de la estimación de la curvatura por parte del conductor. • Mejoramiento en la anticipación en la identificación de intersecciones. 	

Tabla 7.12. Resumen de estudios de la FHWA de Estados Unidos (2007 y 2008).

USA FHWA (2007) Iowa y Texas, Estados Unidos	
Diseño del experimento	Evaluación del experimento
Comparar el Módulo de Visibilidad de Marcas del Pavimento del modelo Tarvip con datos de campo obtenidos de varios estudios para la predicción de resultados bajo condiciones similares, con el fin de validar el modelo.	Se seleccionaron niveles mínimos de RL , los cuales fueron evaluados para identificar los factores que afectan la visibilidad de la demarcación.
Conclusiones:	
<ul style="list-style-type: none"> • Se identificaron factores que afectan los niveles de visibilidad de las demarcaciones del pavimento como la configuración de dichas marcas, tipo de superficie del pavimento, velocidad de los vehículos que transitan por la zona y el tipo de vehículos y la presencia de Marcas retrorreflectivas en el pavimento. • Se desarrolló una metodología usando Tarvip para la realización de análisis de sensibilidad de los factores que afecta el modelo. • Resultaron valores promedio de RL bajo las condiciones típicas de las carreteras de los Estados Unidos y las bases de nuevas recomendaciones. 	
USA FHWA (2008) Texas y Washington, Estados Unidos	
Diseño del experimento	Evaluación del experimento
Evaluar el impacto económico de implementar niveles de retrorreflectividad mínimos a partir de una hoja de cálculo. Esta hoja de cálculo considera el impacto de los niveles de retrorreflectividad, escogencia de materiales, costo de materiales, tipo de carretera y la longitud de las carreteras.	Se usó la herramienta de análisis para evaluar diferentes escenarios que consideran los niveles de retrorreflectividad, costo de demarcación y selección del material.
Conclusiones:	
Usando un rango medio para los costos de demarcación asumidos en el reporte, se obtuvo que el impacto económico de la implementación de niveles mínimos de retrorreflectividad se encuentra entre los \$0 a los \$150 millones por año. El análisis mostró que para algunos casos existe un ahorro potencial al comparar las prácticas empleadas actualmente con algunas como el uso de materiales de demarcación del pavimento más durables.	

Tabla 7.13. Resumen del estudio de Rasdorf, Zhang, Hummer y Sitzabee (2009).

Rasdorf, Zhang, Hummer y Sitzabee (2009) Carolina del Norte, Estados Unidos	
<p style="text-align: center;">Diseño del experimento</p> <p>Encontrar diferencias significativas entre las líneas de borde y las líneas de centro tanto para la demarcación con material termoplástico amarillo y blanco.</p> 	<p style="text-align: center;">Evaluación del experimento</p> <p>Mediante análisis de ANOVA y métodos de análisis longitudinal de datos se confirmaron las diferencias significativas entre los diferentes tipos de demarcación. Se desarrolló un método de conteo para analizar las imágenes y obtener la densidad de microesferas de vidrio en cada tramo. Luego se buscó una correlación entre la retrorreflectividad y la densidad de microesferas.</p>
<p>Conclusiones:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Los resultados indicaron que las líneas de borde se degradan a un ritmo más lento que las líneas de centro. • El estudio encontró que la densidad de microesferas tiene un impacto significativo en la retrorreflectividad de la demarcación. Entre mayor densidad mayor retrorreflectividad. • La retrorreflectividad en las marcas termoplásticas del pavimento se degrada más rápidamente en las zonas montañosas que en el área central o costera. • Para zonas con TPD de 10 000 vehículos la expectativa de vida de servicio para material termoplástico en asfalto está en el rango de 5,4 a 8,75 años dependiendo del color y localización. 	

Tabla 7.14. Resumen del estudio de Sasidharan, Karwa y Donnell (2009).

Sasidharan, Karwa y Donnell (2009) Pensilvania, Estados Unidos	
Diseño del experimento	Evaluación del experimento
El Departamento de Transportes de Pensilvania recolectó datos de retrorreflectividad de las marcas del pavimento en 88 segmentos de carretera en el periodo de mayo 2007 hasta mayo 2008. Los materiales involucrados en el estudio fueron pintura base agua y epóxicos.	El objetivo de la investigación es desarrollar modelos de degradación de la demarcación del pavimento que puede ser utilizado para implementar un sistema de mantenimiento eficiente.
<p>Conclusiones:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Se encontró que tanto para la marcas epóxicas como para las bases de agua la retrorreflectividad decrece con el paso del tiempo. • Las marcas de color blanco tienen vidas de servicio mayores que las marcas de color amarillo. • La exposición al tráfico vehicular está relacionada negativamente con la retrorreflectividad de las demarcaciones hechas con pintura con base de agua, pero no era un factor estadísticamente significativo en las marcas epóxicas. • Un análisis del costo del ciclo de vida mostró que las pinturas a base de agua son más efectivas en cuanto a costo que las marcas epóxicas si son aplicadas a nivel estatal. 	

Tabla 7.15. Resumen del estudio de Rasdorf, Zhang y Hummer (2009).

Cuadro Rasdorf, Zhang y Hummer (2009) Carolina del Norte, Estados Unidos	
Diseño del experimento	Evaluación del experimento
La investigación recolectó datos de retroreflectividad de la demarcación de líneas de centro en autopistas de dos carriles, las mediciones fueron tomadas en dos direcciones.	Una prueba <i>t</i> aplicada a los datos muestra que diferencias que son estadísticamente significativas. Se estudió la relación entre la dirección en que se pintaron las marcas y la dirección de la retroreflectividad.
Dirección del tránsito, aplicación de los materiales de demarcación vial y dirección de las mediciones de retroreflección nocturna R_L	
Conclusiones:	
<ul style="list-style-type: none"> • Los valores medidos en la dirección de la creación de las líneas de pintura son significativamente más altos que los medidos en la dirección contraria. • Los resultados indican que los valores de retroreflectividad que deben compararse con los valores mínimos estándares propuestos por la Administración Federal de Autopistas (FHWA) porque los conductores en esa dirección experimentan una retroreflectividad menor en la noche. 	

Tabla 7.16. Resumen del estudio de Holzschuher et al. (2010).

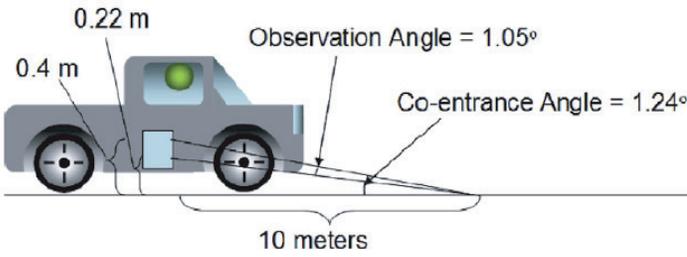
Holzschuher, Choubane, Fletcher, Sevearance y Lee (2010) Florida, Estados Unidos	
Diseño del experimento	Evaluación del experimento
<p>La investigación busca cuantificar el nivel de precisión y la repetibilidad de la colección de datos de retrorreflexión en las marcas de pavimentos de la unidad retrorreflectómetro móvil, para así determinar las características de la retrorreflectividad de la demarcación en servicio de las carreteras de Florida. Los datos recolectados fueron únicamente de líneas de borde blancas.</p>	<p>Se seleccionaron 6 sitios de forma aleatoria. Se recolectaron aproximadamente 155 mediciones por cada 0,16 km viajando a una velocidad de 80 km/h. Para estimar la precisión en términos de la repetibilidad para una unidad específica se hizo una calibración con un solo operador y un tiempo.</p>
<p>Retrorreflectómetro móvil</p> <div style="display: flex; align-items: center;">   </div>	
<p>Conclusiones:</p> <p>La desviación y el coeficiente de variación determinado fue de 7,1 mcd/m²/lux y 2,4% respectivamente y los resultados de dos pruebas usando la misma unidad reflectómetro móvil del mismo tramo de prueba mostraron que los resultados no deben diferir por más de 20,1 mcd/m²/lux o 6,7% con nivel de confianza 95% para el rango de valores en los que se encontraron las pruebas.</p>	

Tabla 7.17. Resumen del estudio de Hummer, Rasdorf y Zhang (2011).

Hummer, Rasdorf y Zhang (2011) Carolina del Norte, Estados Unidos	
Diseño del experimento Aplicar el modelo lineal de efectos mixtos para describir el comportamiento de los datos de retrorreflexividad de las marcas de pintura y así dar un mejor manejo al sistema de mantenimiento.	Evaluación del experimento Se compararon los resultados obtenidos con el modelos lineal de efectos mixtos con los obtenidos por otros modelos y estos a su vez se compararon con los datos reales.
Resultados de retrorreflexión	
Línea blanca de borde	Línea amarilla de centro
Conclusiones: Se encontraron tres ventajas con el uso del modelo lineal de efectos mixtos: <ul style="list-style-type: none"> • Toma en cuenta la correlación entre las mediciones repetidas en la misma marca. • Es un modelo flexible por lo que se puede aplicar a diferentes situaciones. • La precisión en la predicción aumenta con la cantidad de datos disponibles. 	

Tabla 7.18. Resumen del estudio de Fu y Wilmot (2012).

Fu y Wilmot (2012) Louisiana, Estados Unidos	
Diseño del experimento	Evaluación del experimento
<p>Se tomaron aproximadamente 3500 lecturas de retrorreflectividad tomadas entre el 2002 y el 2007, en diferentes materiales como termoplástico, cintas y marcas de perfil invertido en las autopistas interestatales de Louisiana, para determinar un modelo de comparación, con el fin de determinar el material con mejor desempeño y así, justificar la elección del material que se aplicará.</p>	<p>Se crea un modelo que permite la comparación entre el valor relativo de la marca para pavimento alternativa dadas las condiciones del lugar de aplicación como el tipo de superficie, la vida útil del pavimento, volumen de tráfico, tipo de línea y color de línea.</p>
<p>Medida del beneficio del usuario con respecto a la retrorreflexión de las marcas viales:</p>	
<p>Conclusiones:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Se describieron las condiciones de aplicación en términos del tipo de pavimento, número de carriles, vida de servicio restante de las marcas ya existentes, casos de pavimentos nuevos que requieren nuevas marcas o pavimentos viejos que requieren redemarcar y el tipo y color de la línea requerida. • El modelo creado incorpora la medición del beneficio estimando el número de usuarios que experimentan una retrorreflectividad aceptable durante la vida útil de cada material. • El procedimiento incorpora más factores en el análisis que los procedimientos conocidos antes, algunos de estos factores son: condiciones del sitio, un grupo considerable de los costos y diferentes opciones de implementación. 	

Tabla 7.19. Resumen del estudio de Hollingsworth (2012).

Hollingsworth (2012) Carolina del Norte, Estados Unidos																									
<p style="text-align: center;">Diseño del experimento</p> <p>Uno de los objetivos del estudio fue desarrollar un modelo de desempeño de la retrorreflectividad con en el fin de manejar de manera más efectiva y eficiente el presupuesto anual dirigido al mantenimiento de la demarcación del pavimento. Específicamente se buscó cuantificar el impacto que tiene el tipo de esferas de vidrio en la degradación de las marcas de pintura y termoplásticos en Carolina del Norte.</p>	<p style="text-align: center;">Evaluación del experimento</p> <p>En primera instancia se observaron los grupos de datos con que se contaba, a los cuales se les aplicó un análisis de valor promedio y de varianza usando la prueba de Wilcoxon y por último se describe el modelo obtenido de la regresión lineal que incluye el tipo de microesfera como variable significativa.</p>																								
<p>Mediciones de retrorreflexión de pintura de tránsito con diferentes tipos de microesferas de vidrio, estándar y grandes.</p>	<table border="1" style="margin: 10px auto;"> <caption>Data points estimated from the graph</caption> <thead> <tr> <th>Time (months)</th> <th>Standard (mod/m²/lux)</th> <th>Large (mod/m²/lux)</th> <th>Delta (mod/m²/lux)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>300</td> <td>300</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>240</td> <td>220</td> <td>-20</td> </tr> <tr> <td>12</td> <td>200</td> <td>200</td> <td>-10</td> </tr> <tr> <td>24</td> <td>160</td> <td>180</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td>36</td> <td>120</td> <td>180</td> <td>50</td> </tr> </tbody> </table>	Time (months)	Standard (mod/m²/lux)	Large (mod/m²/lux)	Delta (mod/m²/lux)	0	300	300	0	6	240	220	-20	12	200	200	-10	24	160	180	10	36	120	180	50
Time (months)	Standard (mod/m²/lux)	Large (mod/m²/lux)	Delta (mod/m²/lux)																						
0	300	300	0																						
6	240	220	-20																						
12	200	200	-10																						
24	160	180	10																						
36	120	180	50																						
<p>Conclusiones:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Existe una diferencia significativa en el índice de degradación de la retrorreflectividad entre las micro esferas estándares y las de mayor tamaño, así como el costo que implican en zonas donde se utilizan quitanieves. • Es más económico usar demarcación termoplástica con microesferas estándares pues cuesta menos y se desempeña mejor. 																									

Tabla 7.20. Resumen del estudio de Robertson, Sarasua, Johnson y Davis (2012).

Robertson, Sarasua, Jonhson y Davis (2012) Carolina del Sur, Estados Unidos	
Diseño del experimento	Evaluación del experimento
<p>El análisis se basó en carreteras no interestatales primarias y secundarias en Carolina del Sur. El método se desarrolló usando 3 años de datos de campo recolectados de 66 sitios.</p>	<p>Se desarrolló un método para estimar y comparar los ciclos de vida de pinturas a base de agua de alto espesor y espesor regular, basados en los niveles de retrorreflexividad.</p>
<p>Resultados de retrorreflexión para línea blanca de borde</p> <p>The graph plots Median Retroreflectivity (mc/m²/lux) on the y-axis (100 to 550) against Days Since Application on the x-axis (0 to 800). The legend includes the following sites and their ADT values: Site #86 ADT=200, Site #87 ADT=200, Site #89 ADT=200, Site #90 ADT=200, Site #91 ADT=200, Site #93 ADT=300, Site #94 ADT=325, Site #88 ADT=500, Site #150 ADT=500, Site #95 ADT=600, Site #97 ADT=600, Site #92 ADT=1000, Site #99 ADT=1000, Site #98 ADT=1500, and Site #96 ADT=3500. The data points are connected by lines, showing that retroreflectivity generally decreases over time for all sites, with higher ADT sites showing a steeper decline.</p>	
<p>Conclusiones:</p> <p>El análisis indica que las marcas de gran espesor tardan considerablemente más tiempo que las marcas de espesor regular y son más efectivas en relación al costo, basados en datos de carreteras de dos carriles con un TPD mayor igual a 2000 vehículos.</p>	

8. METODOLOGÍA

La metodología de este proyecto se desarrolla en esta sección, incluyendo el proceso de muestreo, la elección de los sitios de prueba, el equipo utilizado, los procedimientos, el plan de análisis y el diseño experimental.

8.1 ELECCIÓN DE RUTAS Y SUS CARACTERÍSTICAS

El proyecto inició con una ruta de prueba, la ruta de travesía del LanammeUCR, enfrente de la Ciudad de la Investigación de la Universidad de Costa Rica (Figura 8.1). La Dirección General de Ingeniería de Tránsito (DGIT) colaboró con la demarcación de este tramo con pintura base agua. Con respecto a los proyectos de demarcación vial horizontal de CONAVI, se escogieron las rutas nacionales 3 y 110, tal como se observa en la Figura 8.1. Las figuras 8.2, 8.3 y 8.4 muestran el detalle de los tramos evaluados.

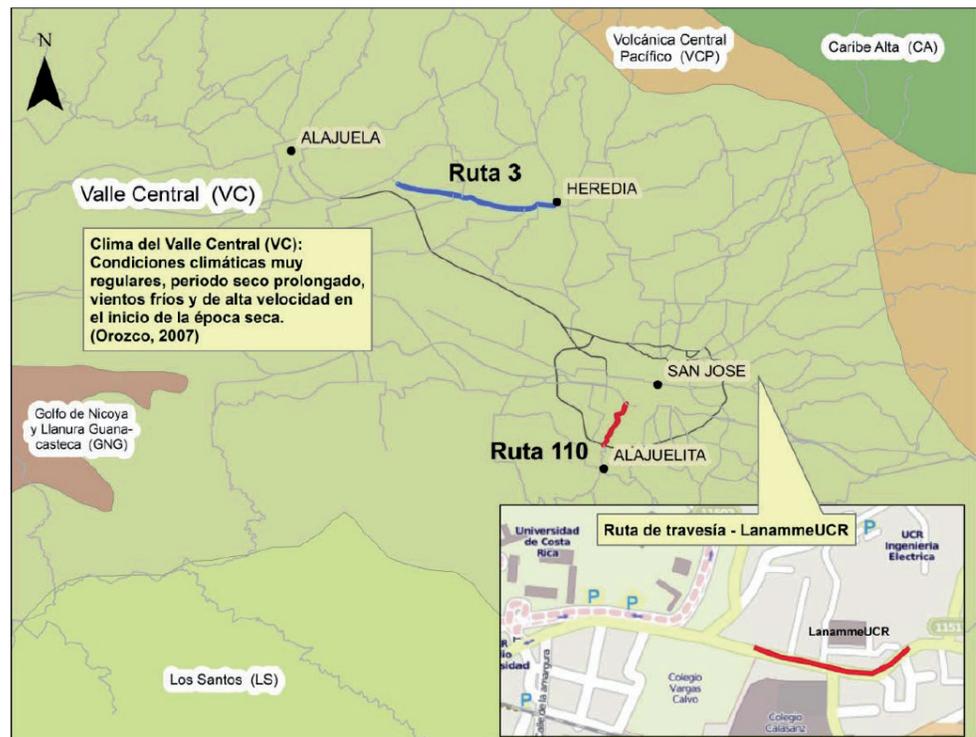


Figura 8.1

Secciones de estudio de las rutas nacionales 3, 110 y la ruta de travesía LanammeUCR para mediciones del parámetro de retroreflexión.

Ruta de estudio: Ruta de travesía - LanammeUCR

TRAMO: De la entrada sur a la Ciudad de la Investigación de la UCR, se demarcó un tramo de 100 metros hacia el este y hacia el oeste

Demarcación del tramo: (Demarcado por la DGIT)	<i>17 de febrero de 2012</i>
Superficie de rodamiento:	<i>Carpeta asfáltica en estado regular</i>
Material de demarcación vial:	<i>Pintura base agua (acrílica)</i>
Zona climática: (Según zonificación de Orozco, 2007)	<i>Valle Central (VC)</i>
Tránsito Promedio Diario (TPD):	<i>IND (Disponible únicamente un conteo de 7 horas de la DGIT del día 14/8/2013)</i>

Ubicación del tramo: (Google Maps, 2014)



Demarcación del 17 de febrero de 2012



Visita del día 13 de abril de 2012



Figura 8.2

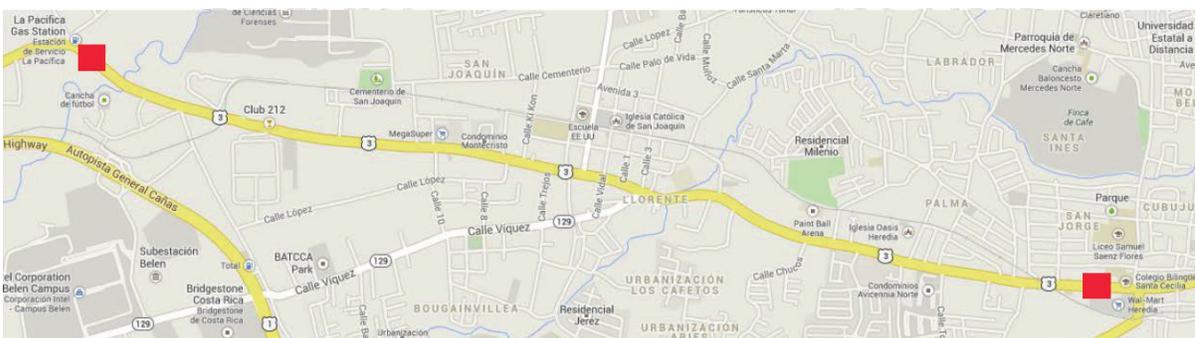
Detalles del tramo evaluado ruta de travesía.

Ruta de estudio: Ruta Nacional 3

TRAMO: Del Colegio Santa Cecilia en San Francisco de Heredia a la estación de servicio La Pacífica en Río Segundo de Alajuela

Primera visita de campo: (Tramo en proceso de demarcación: marzo 2012)	<i>7 de marzo de 2012</i>
Superficie de rodamiento:	<i>Carpeta asfáltica nueva</i>
Material de demarcación vial:	<i>Termoplástico</i>
Zona climática: (Según zonificación de Orozco, 2007)	<i>Valle Central (VC)</i>
Tránsito Promedio Diario (TPD): (Anuario del MOPT 2012 y 2013)	<i>22 872 (2012), 28 029 (2013)</i>

Ubicación del tramo: (Google Maps, 2014)



Visita del día 7 de marzo de 2012



Visita del día 20 de marzo de 2012



Figura 8.3

Detalles del tramo evaluado Ruta Nacional 3.

Ruta de estudio: Ruta Nacional 110

TRAMO: De la Clínica Dr. Solón Núñez a la Corporación Numar, cantón central de San José

Primera visita de campo:

8 de marzo de 2012

(Tramo en proceso de demarcación: marzo 2012)

Superficie de rodamiento:

Carpeta asfáltica nueva

Material de demarcación vial:

Pintura base solvente (alquídica)

Zona climática:

Valle Central (VC)

(Según zonificación de Orozco, 2007)

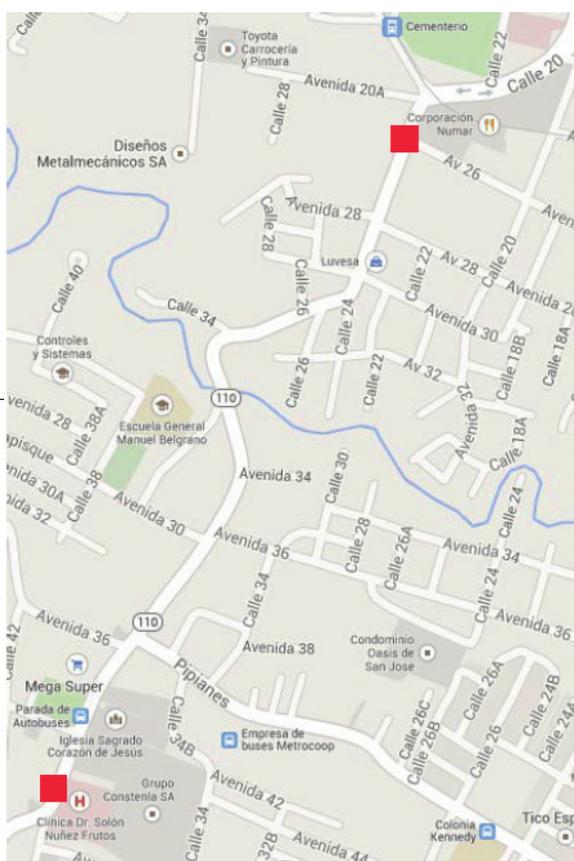
Tránsito Promedio Diario (TPD):

20 982 (2012), 21 330 (2013)

(Anuario del MOPT 2012 y 2013)

Ubicación del tramo: (Google Maps, 2014)

Visita del día 7 de marzo de 2012



Visita del día 20 de marzo de 2012



Figura 8.4

Detalles del tramo evaluado Ruta Nacional 110.

8.2 EQUIPOS DE MEDICIÓN DE RETRORREFLEXIÓN

Las mediciones de retrorreflexión horizontal, en unidades $\text{mcd}/\text{m}^2/\text{lx}$ (milicandelas por metro cuadrado por lux), se llevaron a cabo utilizando dos equipos diferentes, uno manual y otro móvil, cuyo uso dependió de la longitud de las secciones evaluadas, así como por motivos de seguridad a la hora de efectuar las mediciones. En el análisis de los datos, se hará referencia al equipo que fue utilizado en cada caso particular. Se detalla a continuación cada uno de los equipos y su procedimiento específico.

Equipo 1. Retrorreflectómetro horizontal de mano (marca Easylux)

Para el caso específico del equipo Easylux (equipo manual con que cuenta el LanammeUCR para la medición de retrorreflexión), el ángulo de iluminación de $1,24^\circ$ (ASTM E1710) corresponde a una geometría de 30 m y el ángulo de iluminación de $3,5^\circ$ corresponde a una geometría de 15 m.

Tabla 8.1. Especificaciones del retrorreflectómetro manual Easylux.

Características del retrorreflectómetro manual Easylux			
Geometría	Observación	Incidencia	
15 metros	$1,5^\circ$	$88,5^\circ$	
30 metros	$1,05^\circ$	$88,76^\circ$	
Rango de medición del Easylux: Condición húmeda (R_h): De 0 a $200 \text{ mcd}/\text{m}^2/\text{lx}$ Difusión de luz (Q_D): De 0 a $318 \text{ mcd}/\text{m}^2/\text{lx}$			

Este equipo se utilizó en las rutas 3 y 110, así como en el tramo de prueba en la ruta de travesía enfrente del LanammeUCR.

Equipo 2. Retrorreflectómetro horizontal dinámico o móvil (marca Laserlux)

Para el caso del Laserlux (equipo móvil con que cuenta el LanammeUCR para la medición de retrorreflexión), el ángulo de iluminación es de $1,24^\circ$ (ASTM E1710), que corresponde a una geometría de 30 m. El Laserlux puede realizar más de 720 mediciones por kilómetro si se transita a una velocidad de 100 km/h. Puede funcionar a diferentes temperaturas, en un rango de 2°C a 43°C , y bajo condiciones de humedad relativa entre 5 a 95%.

Tabla 8.2. Especificaciones del retrorreflectómetro móvil Laserlux.

Características del retrorreflectómetro móvil Laserlux			
Geometría	Observación	Incidencia	
30 metros	$1,05^\circ$	$88,76^\circ$	

8.3 DISEÑO EXPERIMENTAL Y PROCEDIMIENTO DE MUESTREO

El diseño experimental teórico utilizado con el retrorreflectómetro manual se muestra en la siguiente figura. En el caso del retrorreflectómetro móvil, el equipo permite únicamente realizar mediciones en demarcación de líneas, sean de centro, de carril o de borde.

Mediciones de retrorreflexión			7-14 días T_{i_0} inicial	T_{i_1}	T_{i_2}	T_{i_3}	T_{i_4}
Ruta j	Sección j.1	-Línea de centro	Obs	Obs	Obs	Obs	Obs
	Sección j.2	-Línea de carril -Flechas	Obs	Obs	Obs	Obs	Obs
	Sección j.3	-Números -Letras	Obs	Obs	Obs	Obs	Obs

Figura 8.5

Diseño general del experimento para toma de muestras de retrorreflexión

Ruta de travesía enfrente del LanammeUCR

En la ruta de prueba enfrente de la entrada sur de la Ciudad de la Investigación de la Universidad de Costa Rica se demarcó doble línea amarilla de centro, en un ruta de un carril por sentido. Para la medición de la retrorreflexión se utilizó el equipo manual y se tomaron datos en 7 fechas diferentes: dos en febrero, dos en marzo, una en abril, una en mayo, una día en julio y una en diciembre de 2012. Adicionalmente, se tomó medición una fecha en el mes de julio de 2012 con el retrorreflectómetro móvil. En el tramo de cerca de 200 metros, se escogieron 17 puntos de medición y se tomaron mediciones en ambas líneas, para un total de 34 mediciones por cada día de medición.

En el caso de la doble línea amarilla de centro, el procedimiento entre equipo móvil y manual es diferente. El equipo móvil funciona con dos láser de alta precisión, con el fin de poder evaluar simultáneamente la línea izquierda y la línea derecha, sea continua o discontinua. En el caso del equipo manual, se evalúa en una dirección la línea amarilla más cercana al paso de los vehículos. Estas diferencias se aprecian en la Figura 8.6.

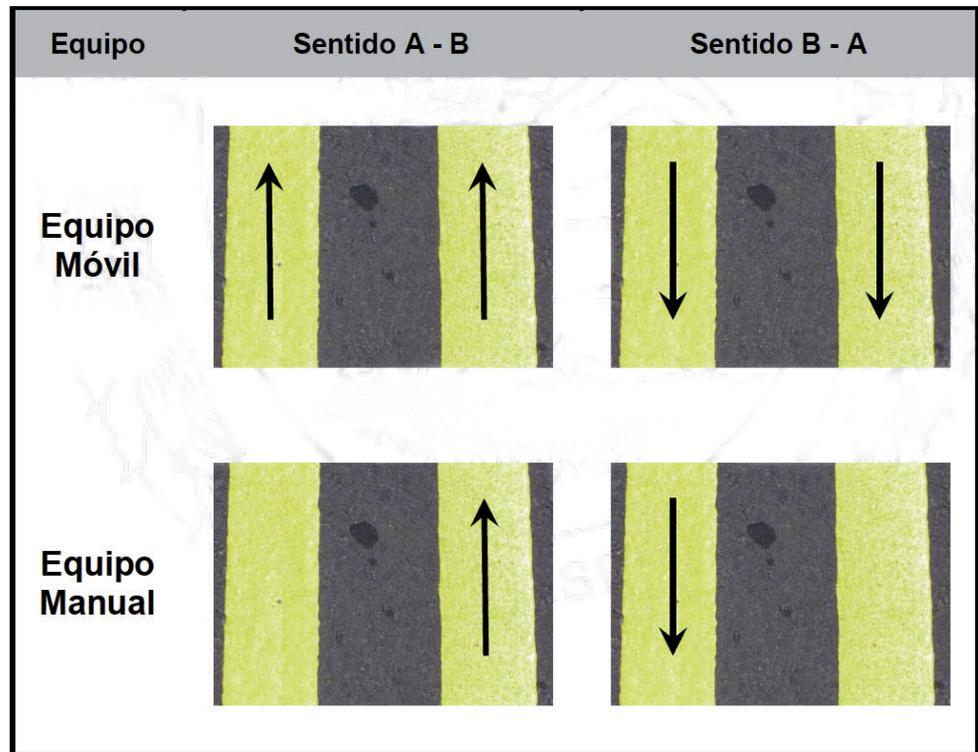


Figura 8.6

Esquema de medición de doble línea amarilla con equipo manual y móvil.

Rutas nacionales 3 y 110

En la R.N. 3 se seleccionaron 2 tramos de medición, y en la R.N. 110 se seleccionaron 3 tramos, todos entre 50 y 100 metros de longitud. La R.N. 3 fue demarcada por una misma empresa, en material termoplástico; sin embargo, en el caso de la ruta 110, dos empresas pintaron el tramo con pintura base solvente. En cada sección de estudio, se midió retrorreflexión en la línea central amarilla, la cual en estos casos es doble línea amarilla, y un mínimo de 30 mediciones por línea. Seguidamente se midieron cerca de 30 puntos sobre línea discontinua de carril de color blanco (la más cercana a la línea de centro). En los casos de un único carril por sentido, se midió la línea continua de borde de color blanco. Finalmente, se muestrearon las flechas, las letras y los números (color blanco), también con un mínimo de 30 mediciones. En ambas rutas se midió retrorreflexión con el equipo manual en 4 fechas: marzo, abril, mayo y diciembre de 2012.

8.4 ALCANCE Y LIMITACIONES

Con el fin de comenzar a desarrollar conocimiento y experiencia en el tema del desempeño de los diferentes sistemas de demarcación vial utilizados en el país, se decidió dividir el proyecto en etapas (subproyectos) que permitan ir adicionando al estudio más rutas a lo largo del país, y poder así incorporar el estudio de más factores influyentes en la durabilidad de la demarcación. Los siguientes aspectos resumen el alcance de la etapa inicial y sus principales limitaciones:

- Las prácticas, métodos y cuidados previos, durante y después de la aplicación de los materiales, como factores influyentes en la durabilidad y calidad del sistema de demarcación vial no fueron considerados en esta etapa inicial. Más específicamente, no se consideraron aspectos como: duración y condición de almacenamiento de los materiales, procedencia de los materiales, traslado de los materiales, dilución de la pintura (en el caso de pintura base agua o solvente), utilización del equipo adecuado, limpieza y calidad del equipo de demarcación, obstrucción en las boquillas, limpieza previa de la superficie de rodamiento, medición de la temperatura ambiental y del pavimento, medición de la humedad relativa, medición de espesores, tiempos de secado, ni apertura de la vía al tránsito vehicular.
- Se tomaron inicialmente 4 rutas de estudio: las rutas nacionales 1, 3 y 110, y un tramo de prueba en la ruta de travesía del LanammeUCR, enfrente de la entrada sur de la Ciudad de la Investigación de la UCR. En próximos estudios se incorporarán más rutas, ya sea demarcadas por CONAVI o por la DGIT.
- Las rutas escogidas para este acercamiento al problema se encuentran en la región central del país, por lo que no abarcan las diferentes condiciones del país ni de la red vial. En los siguientes proyectos se incluirán rutas en diversas zonas del país con el fin de contar con una muestra mayor de rutas o tramos con diversidad climática, con diferentes condiciones de tráfico vehicular y diferente estado de la superficie del pavimento, con tramos de control para poder comparar estadísticamente los resultados, e incluso, desarrollar modelos que se ajusten a diversas condiciones.
- Actualmente en los proyectos de demarcación vial horizontal realizados en el país se utilizan los siguientes materiales: pintura base agua, pintura base solvente, material termoplástico, junto con las microesferas de vidrio. Cualquier otro material de demarcación vial horizontal no forma parte de este estudio; sin embargo, queda abierta la posibilidad de estudiar más materiales o nuevas tecnologías que entren al país.

9 RESULTADOS Y ANÁLISIS

En esta sección se explica el procesamiento de los datos de retrorreflexión, los resultados obtenidos de las mediciones, y el análisis de los datos.

9.1 DATOS DEL RETRORREFLECTÓMETRO MANUAL

Los datos del retrorreflectómetro manual se bajan a la computadora a través de un software que viene con el equipo. Un ejemplo de la salida del equipo se muestra en la Figura 9.1. Tal como se puede observar, se indica el kilómetro, tipo y color de línea, el valor de retrorreflexión RL con geometría a 15 m y a 30 m, el valor de retrorreflexión diurna QD, la humedad relativa rH, la temperatura ambiente Ta, y las coordenadas geográficas. Además, el mismo software calcula las estadísticas básicas: moda, máximo, mínimo, media y desviación estándar. El dato principal para el análisis es el promedio, con geometría de 30 m; es decir, la media de RL (30 m). En la figura de ejemplo, correspondería a un valor de retrorreflexión de 127 mcd/m²/lx, redondeando el valor al entero más cercano.

[km]	Tipo	RL(15 m) [mcd/m ² /lx]	RL(30 m) [mcd/m ² /lx]	QD [mcd/m ² /lx]	rH [%]	Ta [°C]	Latitud	Longitud
50,5	Continuas (AMARILLO)	240	154	51	45	30	9,934748333	-84,04600833
50,5	Continuas (AMARILLO)	245	150	45	45	30	9,934748333	-84,04600833
50,5	Continuas (AMARILLO)	153	90	49	45	30	9,934748333	-84,04600833
50,5	Continuas (AMARILLO)	206	120	55	45	30	9,934748333	-84,04600833
50,5	Continuas (AMARILLO)	167	95	59	45	30	9,934748333	-84,04600833
50,5	Continuas (AMARILLO)	192	113	59	45	30	9,934748333	-84,04600833
50,5	Continuas (AMARILLO)	194	108	51	45	30	9,934748333	-84,04600833
50,5	Continuas (AMARILLO)	234	147	58	45	30	9,934748333	-84,04600833
50,5	Continuas (AMARILLO)	225	144	35	45	30	9,934748333	-84,04600833
50,5	Continuas (AMARILLO)	227	102	57	45	30	9,934748333	-84,04600833
50,5	Continuas (AMARILLO)	213	145	40	44	31	9,934718333	-84,04592
50,5	Continuas (AMARILLO)	191	118	58	44	31	9,934718333	-84,04592
50,5	Continuas (AMARILLO)	211	131	55	44	31	9,934718333	-84,04592
50,5	Continuas (AMARILLO)	195	128	35	44	31	9,934718333	-84,04592
50,5	Continuas (AMARILLO)	232	145	57	43	31	9,934718333	-84,04592
50,5	Continuas (AMARILLO)	228	141	58	43	31	9,934718333	-84,04592
50,5	Continuas (AMARILLO)	242	152	59	43	31	9,93473	-84,04594667
50,5	Continuas (AMARILLO)	172	104	57	43	31	9,93473	-84,04594667

Estadística	RL(15 m)	RL(30 m)	QD
Moda	244	145	59
Máximo	245	154	59
Mínimo	153	90	35
Media	209,2777778	127,0555556	52,11111111
Desv. Estándar	27,40932764	21,23668364	8,152147959

Figura 9.1

Ejemplo de salida de datos del retrorreflectómetro manual EASYLUX.

9.2 DATOS DEL RETRORREFLECTÓMETRO MÓVIL

Los datos del retrorreflectómetro móvil requieren un cuidadoso procesamiento, con el fin de poder realizar una buena interpretación de los resultados. Para ello se utilizó una metodología basada en la experiencia en el uso del equipo y de un grupo de especialistas del Departamento de Transportes de la Florida, en Estados Unidos.

En la Figura 9.2 se muestra un ejemplo del reporte de datos, tal como se obtiene del retrorreflectómetro móvil, el cual contiene la siguiente información: estación (km), referencia, tipo de línea, escaneos válidos de la línea izquierda y derecha, la retrorreflectividad promedio de las dos líneas, y las coordenadas. En cuanto a los escaneos válidos, el equipo registra el número de puntos, los valores máximos y mínimos, el promedio y la desviación estándar.

Tabla N°5: Medición con el Retrorreflectómetro Horizontal (Sabana-Aeropuerto - línea de centro color Amarilla)
Prueba realizada sobre carpeta asfáltica. Ruta 1
Fecha de realización de la prueba: 31 de julio y 1 de Agosto 2012

Estación (km)	Sentido de evaluación	Tipo de línea	Escaneos válidos de la línea izquierda (Retrorreflectividad en mcd/m ² /lux)					Escaneos válidos de la línea derecha (Retrorreflectividad en mcd/m ² /lux)					Retrorreflectividad promedio de las dos líneas (mcd/m ² /lux)	Coordenadas	
			Puntos	Valor Máx.	Valor Mín.	Promedio	Desviación Estándar	Puntos	Valor Máx.	Valor Mín.	Promedio	Desviación Estándar		Longitud	Latitud
0.00	Sabana-Aeropuerto (l.parte)	Inicio	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-84.058274	9.938644
0.03	Sabana-Aeropuerto (l.parte)	Simple continua	39	32.48	2.45	18.75	5.81	4	26.43	9.76	19.21	7.37	18.98	-84.058297	9.938980
0.11	Sabana-Aeropuerto (l.parte)	Simple continua	67	36.61	8.85	17.73	5.08	6	16.88	9.98	14.14	2.47	15.94	-84.058312	9.939637
0.24	Sabana-Aeropuerto (l.parte)	Simple continua	36	128.36	10.94	30.97	31.79	9	18.94	12.17	15.13	2.36	23.05	-84.058366	9.940904
0.34	Sabana-Aeropuerto (l.parte)	Simple continua	275	2523.87	24.36	119.84	159.61	0	0.00	0.00	0.00	0.00	119.84	-84.058640	9.941123
0.44	Sabana-Aeropuerto (l.parte)	Simple continua	194	849.33	20.84	109.40	84.45	3	195.40	74.19	105.21	30.61	107.31	-84.059213	9.942453
0.54	Sabana-Aeropuerto (l.parte)	Simple continua	167	701.53	21.04	107.44	93.00	1	0.00	0.00	0.00	0.00	107.44	-84.059869	9.942843
0.65	Sabana-Aeropuerto (l.parte)	Simple continua	156	326.51	28.12	101.12	36.25	0	0.00	0.00	0.00	0.00	101.12	-84.100906	9.943019
0.75	Sabana-Aeropuerto (l.parte)	Simple continua	127	670.45	18.04	97.15	86.67	1	0.00	0.00	0.00	0.00	97.15	-84.101814	9.943063
0.85	Sabana-Aeropuerto (l.parte)	Simple continua	122	666.86	0.00	87.80	63.32	1	0.00	0.00	0.00	0.00	87.80	-84.102707	9.943101
0.95	Sabana-Aeropuerto (l.parte)	Simple continua	143	682.54	17.25	86.58	72.37	12	48.49	15.20	33.00	11.36	59.79	-84.103523	9.943151
1.05	Sabana-Aeropuerto (l.parte)	Simple continua	162	681.65	23.04	100.58	93.64	4	28.09	20.28	23.42	2.49	66.00	-84.104353	9.943375
1.15	Sabana-Aeropuerto (l.parte)	Simple continua	134	2520.73	22.51	158.45	263.09	3	115.77	23.51	61.78	50.70	120.12	-84.105232	9.943810
1.25	Sabana-Aeropuerto (l.parte)	Simple continua	99	721.13	12.01	99.35	103.49	1	0.00	0.00	0.00	0.00	99.35	-84.106171	9.943776
1.36	Sabana-Aeropuerto (l.parte)	Simple continua	119	576.31	10.84	77.69	64.28	4	24.94	15.25	18.87	4.49	48.28	-84.107040	9.944896
1.46	Sabana-Aeropuerto (l.parte)	Simple continua	109	621.19	0.33	48.01	61.44	6	28.90	13.03	13.27	6.41	33.64	-84.107689	9.945293
1.56	Sabana-Aeropuerto (l.parte)	Simple continua	106	101.44	8.79	27.86	17.79	19	24.73	12.02	16.81	3.24	22.34	-84.108363	9.945723
1.66	Sabana-Aeropuerto (l.parte)	Simple continua	66	671.06	0.00	84.49	115.96	5	18.61	11.08	15.20	3.28	49.84	-84.109039	9.946316
1.76	Sabana-Aeropuerto (l.parte)	Simple continua	73	637.97	11.79	58.78	103.19	9	18.88	8.33	12.86	3.02	35.81	-84.109573	9.947076
1.86	Sabana-Aeropuerto (l.parte)	Simple continua	90	663.27	0.00	78.48	90.95	5	604.87	12.18	165.00	247.74	121.74	-84.110085	9.947817
1.92	Sabana-Aeropuerto (l.parte)	Simple continua	104	691.91	22.40	121.71	109.87	3	128.99	103.95	114.91	12.81	118.31	-84.110542	9.948496

Figura 9.2

Ejemplo de salida de datos del retrorreflectómetro móvil LASERLUX.

El siguiente cuadro explica brevemente cada uno de estos parámetros e información que recolecta el retrorreflectómetro horizontal móvil.

Tabla 9.1. Parámetros recolectados por el retrorreflectómetro móvil horizontal.

Parámetro	Descripción
Estación y coordenadas	Ubicación de las mediciones por medio de sistemas de información geográfica (SIG) y según los estacionamientos de la pista del aeropuerto.
Referencia y tipo de línea	Descripción de la línea evaluada: línea de borde, de visado, de inicio de pista, de centro, continua, discontinua, etc.
Escaneos válidos	Dada la precisión del escáner láser, no toda la información recibida es válida, por lo que el equipo internamente descarta esta información y únicamente registra los escaneos válidos. Cuando los datos son cero en alguna línea de medición, estos datos no se toman en cuenta para el cálculo de los promedios finales.
Puntos	Corresponde a la cantidad de puntos válidos de medición, los cuales deben ser mayores o iguales a 30, con el fin de obtener una muestra estadísticamente significativa para poder obtener un promedio confiable.
Valor máximo	Corresponde al valor máximo registrado para una línea de medición.
Valor mínimo	Corresponde al valor mínimo registrado para una línea de medición.
Promedio	Corresponde al promedio de mediciones válidas registradas para una línea de medición.
Desviación estándar	Corresponde a la desviación estándar de las mediciones válidas registradas para una línea de medición. Entre menor sea la cantidad de puntos en una línea de medición, mayor será la desviación estándar, por lo que el fabricante recomienda fijar el equipo para intervalos de medición mayores con el fin de aumentar la muestra de puntos válidos, y así disminuir la desviación estándar. Las marcas viales no son superficies homogéneas debido principalmente al acomodo a nivel microscópico de las esferas de vidrio, y la alta precisión del láser del equipo de medición es muy alta, por lo que se esperan altos valores de desviación estándar. La relevancia de la desviación estándar va en función de la naturaleza del ensayo, y en el caso de la retrorreflexión horizontal, no se considera un parámetro relevante en el análisis de los datos, ni que pueda alterar la credibilidad de los resultados.
Retrorreflectividad promedio	Corresponde al valor promedio de retrorreflexión de los dos escaneos que realiza el equipo, a la izquierda y a la derecha, el cual es el que se utiliza en el análisis de resultados, aumentando así el número de puntos válidos.

El procesamiento de los datos se lleva a cabo de la siguiente manera:

Si las mediciones se llevan a cabo en intervalos de medición de 10 metros, se deben agrupar en intervalos de medición de 100 metros, tal como lo recomienda el fabricante, con el fin de aumentar el número de puntos válidos de medición. En este proyecto las mediciones se realizaron directamente cada 100 metros, por lo que se omite este procedimiento.

Una vez agrupadas las mediciones, se descartan datos de la siguiente manera:

- **PASO 1:** Se eliminan los datos con un total de puntos válidos de medición menor a 30. Tal como se explicó en el Cuadro 9.1, esto se realiza para obtener una muestra mínima estadísticamente significativa.
- **PASO 2:** Se eliminan los datos de retrorreflexión iguales a "0" (cero). Estas no son consideradas mediciones, sino que corresponde a autoajustes del equipo durante el ensayo. Estos valores no afectan los promedios finales; sin embargo, se eliminan para no generar confusión y "limpiar" así los datos reales de retrorreflexión.
- **PASO 3:** Se eliminan los datos de retrorreflexión menores a 30 mcd/m²/lx. Al ser el LASERLUX un equipo de alta precisión, este detecta valores bajos de retrorreflexión que no corresponden necesariamente a secciones donde hay presencia de demarcación vial. Estos valores forman parte de lo que se llama "ruido de fondo" (por su término en inglés, "background noise"). Estos valores deben ser eliminados para no afectar los promedios finales ni el análisis de los resultados.

Todos estos pasos nos dan como resultado nuevos promedios para cada línea o grupo de mediciones, así como el valor mínimo, el percentil 85 y la desviación estándar. Finalmente, para facilitar la interpretación de los resultados, se recomienda graficar los datos de retrorreflexión, ya sea para líneas continuas o discontinuas, y compararlo con los límites adecuados según el material y el color utilizados. Para ejemplificar estos pasos en el procesamiento de los datos del retrorreflectómetro móvil, se toman las mediciones del 12 de junio de 2012 de la doble línea de centro amarilla en la Ruta 3, demarcada con pintura termoplástica, sentido Heredia - Alajuela (Cuadro 9.2).

Tabla 9.2. Ejemplo del procesamiento de datos del retrorreflectómetro móvil

Resultados del retrorreflectómetro móvil (mcd/m ² /lx) - RUTA 3				
Sentido: Heredia-Alajuela		Tipo: Doble línea amarilla de centro		
Fecha: 12/06/12		Material: Termoplástico		
DATOS INICIALES:	Datos completos, tal como los registra el retrorreflectómetro móvil.			
	Línea izq.	Desv. Est.	Línea der.	Desv. Est.
Promedio	50,5	48,4	49,3	39,6
Max	149,0	182,2	251,0	287,4
Min	0,0	0,0	0,0	0,0
P85	114,0	98,3	102,3	84,7
PASOS 1 y 2:	Se eliminan los valores con menos de 30 puntos válidos de medición y los valores de retrorreflexión iguales a "0".			
	Línea izq.	Desv. Est.	Línea der.	Desv. Est.
Promedio	56,9	53,8	63,8	49,7
Max	149,0	166,6	131,2	184,1
Min	9,7	1,3	9,8	0,9
P85	115,6	98,2	110,5	97,9
PASO3:	Se eliminan los valores de retrorreflexión menores a 30 mcd/m ² /lx, eliminando así el "ruido de fondo" del equipo.			
	Línea izq.	Desv. Est.	Línea der.	Desv. Est.
Promedio	92,3	86,3	87,9	69,1
Max	149,0	166,6	131,2	184,1
Min	36,5	46,5	31,9	15,7
P85	125,6	110,4	124,6	107,6

Si se toman, por ejemplo, los promedios de mediciones de retrorreflexión de la línea izquierda se observa que el valor con los datos completos es de 50,5 mcd/m²/lx. Una vez eliminados los valores con menos de 30 puntos válidos de medición y los ceros, este valor sube a 56,9 mcd/m²/lx. Finalmente, al eliminar aquellos valores de retrorreflexión menores a 30 mcd/m²/lx, el promedio final sube a 92,3 mcd/m²/lx. De no llevarse a cabo este procedimiento, se estaría incurriendo en un error significativo en el análisis.

9.3 EVALUACIÓN DE LA RETRORREFLEXIÓN

Tal como se explicó en el marco teórico, Costa Rica cuenta con normas de INTECO en el tema de demarcación vial horizontal, el cual fue un esfuerzo de los diferentes sectores relacionados con la demarcación vial horizontal, tanto instituciones públicas como empresas privadas. En estas normas se establecen valores mínimos de retrorreflexión inicial para fiscalización y control de calidad de los proyectos de demarcación vial horizontal en el país, tanto para pinturas base agua y base solvente, como para material termoplástico. En forma adicional, se incluyen valores mínimos de retrorreflexión a 6 meses para el material termoplástico, ya que este cuenta con microesferas de vidrio premezcladas. Para efectos de investigación, la Unidad de Seguridad Vial y Transporte del PITRA LanammeUCR estableció una clasificación en cuatro categorías para los niveles de retrorreflexión, para pinturas base agua y base solvente, y material termoplástico. Además, se establecieron valores diferentes para color blanco y color amarillo, ya que en el espectro de colores, el blanco posee una mayor capacidad de reflectancia.

Tabla 9.3. Niveles de retrorreflexión para pinturas base agua y base solvente.

Material	Pintura base agua y solvente (Valores en mcd/m ² /lx)		Material termoplástico (Valores en mcd/m ² /lx)	
	Blanca	Amarilla	Blanca	Amarilla
Muy buena	> 200	> 150	> 400	> 300
Buena	150 - 200	125 - 150	325 - 400	200 - 300
Regular	100 - 150	100 - 125	100 - 325	100 - 200
Mala ^A	< 100	< 100	< 100	< 100

En el Cuadro 9.3 se muestra la clasificación de retrorreflexión propuesta para fines de investigación y análisis de resultados. Estos valores fueron establecidos considerando las normas de INTECO y los niveles establecidos en otros países.

^A El valor de 100 mcd/m²/lx para todas las categorías representa el valor mínimo que debe asegurarse para que la demarcación vial sea visible durante la noche. Menor a este valor se recomienda volver a demarcar la vía.

9.4 ANÁLISIS DE LA RUTA DE TRAVESÍA LANAMMEUCR

El día 17 de febrero del 2012, la Dirección General de Ingeniería de Tránsito demarcó un tramo de prueba con pintura base agua y microesferas de vidrio frente a la entrada del LanammeUCR (Figura 9.3).



Figura 9.3

Tramo de prueba LanammeUCR con pintura base agua amarilla.

Nota: Tomado de Google Maps, 2012

Una hora después de terminada la demarcación se hicieron mediciones de retrorreflexión con el equipo Easylux (retrorreflectómetro horizontal manual) y se obtuvo así un valor promedio para la geometría de 15 m y de 30 m, tal como se indica en el siguiente cuadro:

Tabla 9.4. Valor de retrorreflexión para pintura acrílica amarilla al finalizar la demarcación.

Mediciones del retrorreflectómetro	RL (15 m)	RL (30 m)	QD
Valores promedio en mcd/m ² /lx	424	250	133

Adicionalmente, el equipo toma mediciones de humedad relativa y temperatura, para un promedio de 48% y 27°C, respectivamente. El valor de retrorreflexión obtenido fue de 250 mcd/m²/lx (RL 30 m), con una desviación estándar de 20 mcd/m²/lx.

Las figuras 9.4 y 9.5 muestran el proceso de demarcación vial, el día 17 de febrero de 2012, y las figuras 9.6 y 9.7 muestran el monitoreo que se llevó a cabo a través de mediciones de la retrorreflexión; se muestra el equipo y la información en pantalla para cada medición.

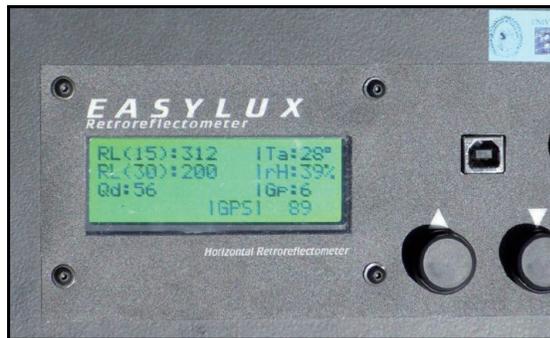
Con el fin de monitorear el deterioro del sistema de demarcación vial, se tomaron mediciones de retrorreflexión los siguientes días: 24 de febrero (a 1 semana de efectuada la demarcación), 2 de marzo (2 semanas), 9 de marzo (3 semanas), 16 de marzo (1 mes), 13 de abril (2 meses), 17 de mayo (3 meses), 2 de julio (4 meses) y, finalmente, 13 de diciembre de 2012 (10 meses). En el Anexo A se encuentra el detalle de todas las mediciones de este tramo de estudio.



Figuras 9.4 y 9.5

Demarcación realizada por la DGIT. Fecha: 17 de febrero, 2012.

Lugar: Frente al LanammeUCR



Figuras 9.6 y 9.7

Figura 9.6 Medición de retroreflexión con el equipo EASYLUX en el tramo de prueba, frente a la entrada principal del LanammeUCR.

Figura 9.7 Pantalla del equipo EASYLUX, Donde se indican los valores de retroreflexión horizontal para las geometrías de 15m y 30m, así como el valor Q_d , la temperatura ambiente y el porcentaje de humedad relativa.

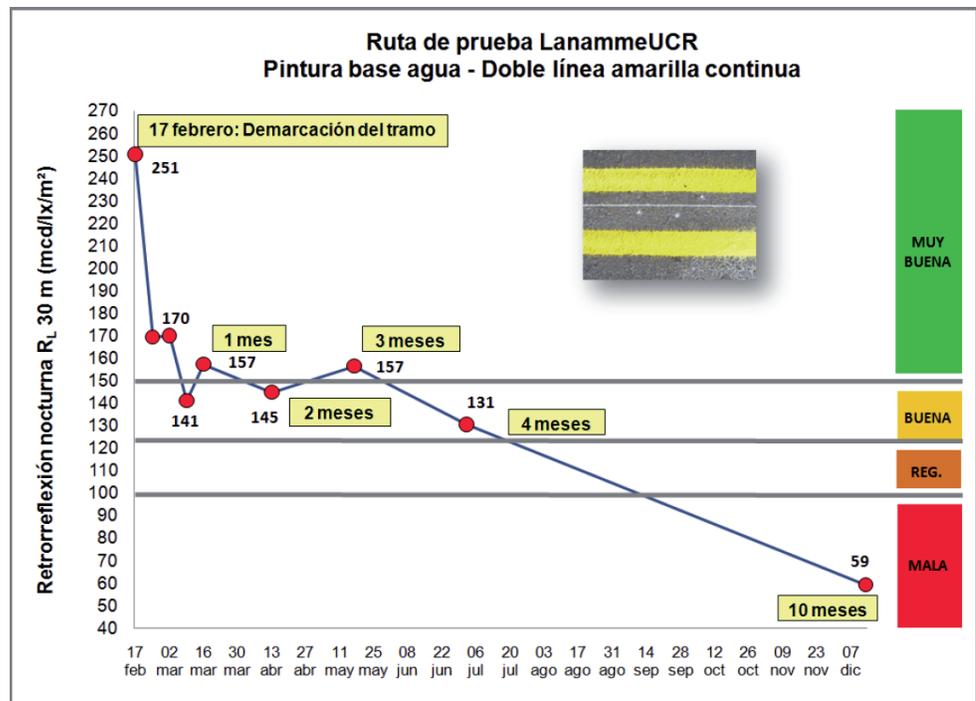
Tabla 9.5. Resultados de retroreflexión horizontal para pintura acrílica amarilla durante los 10 meses de monitoreo del tramo de prueba.

Fechas de Medición (Año 2012)	17 marzo Día 0	24 febrero 1 Sem	2 marzo 2 Sem	9 marzo 3 Sem	16 marzo 1 Mes	13 abril 2 Mes	17 mayo 3 Mes	2 julio 4 Mes	13 dic 10 Mes
Promedio RL (30 m) ± Desv. Est. (mcd/m ² /lx)	251 ± 21	170 ± 22	170 ± 23	141 ± 18	157 ± 19	145 ± 30	157 ± 23	131 ± 23	59 ± 18
Puntos muestreados	14	34	34	34	34	34	34	34	34

Tal como se puede analizar de la tabla anterior, se dio un cambio significativo en la retrorreflexión durante la primera semana. Esto se debe a que recién demarcada una vía, quedan microesferas de vidrio superficiales, no adheridas a la pintura, las cuales inicialmente reflejan altos valores de retrorreflexión. Con el paso de los vehículos durante las primeras horas o los primeros días permanecen aquellas microesferas que quedaron debidamente embebidas en la pintura.

En la siguiente figura se muestra el cambio en la retrorreflexión a través del periodo de 10 meses, y se contrasta con los límites establecidos previamente en el Cuadro 9.3 para pintura de tránsito base agua de color amarillo.

Cabe mencionar que los valores de retrorreflexión mostrados en el gráfico son promedios de datos puntuales, dada la precisión del láser del retrorreflectómetro, por lo que están sujetos a una aleatoriedad típica de este ensayo. Por lo tanto, es importante analizar la tendencia global y no los datos puntuales, para no incurrir en una malinterpretación de los resultados. Por ejemplo, el valor promedio a las 3 semanas fue de 141 mcd/m²/lx, mientras que a la semana siguiente fue de 157 mcd/lx/m², lo cual no puede interpretarse como un aumento de la retrorreflectividad de una semana a otra, sino que se debe al efecto de aleatoriedad de las mediciones. Este efecto, además, se ve reflejado parcialmente en la desviación estándar de los promedios de las mediciones puntuales.



Figuras 9.8

Gráfico de retrorreflexión horizontal, ruta de travesía LanammeUCR.

Siguiendo la tendencia de la retrorreflexión entre los 4 y los 10 meses después de que se demarcó la ruta y asumiendo una degradación lineal de la retrorreflexión, posiblemente entre los meses de agosto y setiembre la demarcación ya presentaba un desempeño regular, para luego caer por debajo del mínimo de 100 mcd/m²/lx hacia finales de setiembre e inicios de octubre. Para la medición de los

10 meses en el mes de diciembre, ya la demarcación se encontraba totalmente desgastada (59 mcd/m²/lx en promedio según las mediciones), con un nivel de retrorreflectividad muy bajo. Dados los resultados, se podría decir que para este tipo de rutas de travesía de bajo tránsito, con un pavimento ya fatigado y con defectos superficiales, y utilizando pintura base agua (acrílica), la durabilidad de este material oscila entre 6 y 8 meses después de su aplicación, manteniendo una retrorreflectividad mínima de 100 mcd/m²/lx. Es decir, el periodo mínimo que se debería de garantizar para la pintura base agua con mínima retrorreflectividad de 6 meses, bajo las condiciones previamente mencionadas.

Además, se debe considerar que el desgaste de cualquier sistema de demarcación vial se va a acelerar durante los meses de mayor precipitación. El periodo de 10 meses en que este tramo fue monitoreado comprende los meses más lluviosos del año para el Valle Central. Por ejemplo, para esta zona climática, durante los meses de enero a abril la precipitación mensual no supera los 50 mm (basado en datos históricos entre 1951 y 1980), mientras que entre mayo y octubre oscila entre 200 y 350 mm (Orozco, 2007).

Retrorreflectómetro manual versus móvil

En cuanto al retrorreflectómetro móvil, en este tramo de prueba únicamente se tomaron mediciones el día 2 de julio de 2012. El equipo toma valores de retrorreflexión para ambas líneas (doble línea amarilla de centro); sin embargo, estos valores se promediaron para poder hacer comparaciones con los datos del retrorreflectómetro manual. En el Cuadro 9.6 se comparan dichos resultados.

Tabla 9.6. Comparación de promedios de retrorreflexión entre equipo manual y móvil.

Tramo de prueba LanammeUCR - Pintura base agua amarilla - Fecha: 02/07/12		
Parámetro de medición	Retrorreflectómetro manual	Retrorreflectómetro móvil
Retrorreflexión promedio	130,65 mcd/m ² /lx	121,72 mcd/m ² /lx
Desv. estándar promedio	22,65 mcd/m ² /lx	31,27 mcd/m ² /lx
Tamaño de la muestra	34	104

Con una prueba estadística t se puede analizar si la diferencia entre esos valores es estadísticamente significativa. Se toman los datos del Cuadro 9.6. y se calcula la desviación estándar combinada (S_{AB}), así como el estadístico experimental t_{exp} . Con estos valores se obtiene por medio de tablas un valor estadístico teórico t_t para dos colas, para un nivel de confianza del 95%. El detalle del cálculo de esta prueba t se explica en el Anexo D. Los dos estadísticos se comparan de la siguiente manera:

- Si $t_{exp} > t_t$ entonces la prueba nos indica que los valores de retrorreflexión promedio son estadísticamente diferentes con un 95% de confianza.
- Si $t_{exp} < t_t$ entonces se interpreta que los valores de retrorreflexión promedio no son significativamente diferentes entre sí, estadísticamente hablando.

Los resultados de la prueba se muestran en el siguiente cuadro, y se obtiene como resultado que los valores de retrorreflexión promedio del equipo manual y el móvil no son significativamente diferentes con un nivel de confianza del 95%, en el tramo evaluado.

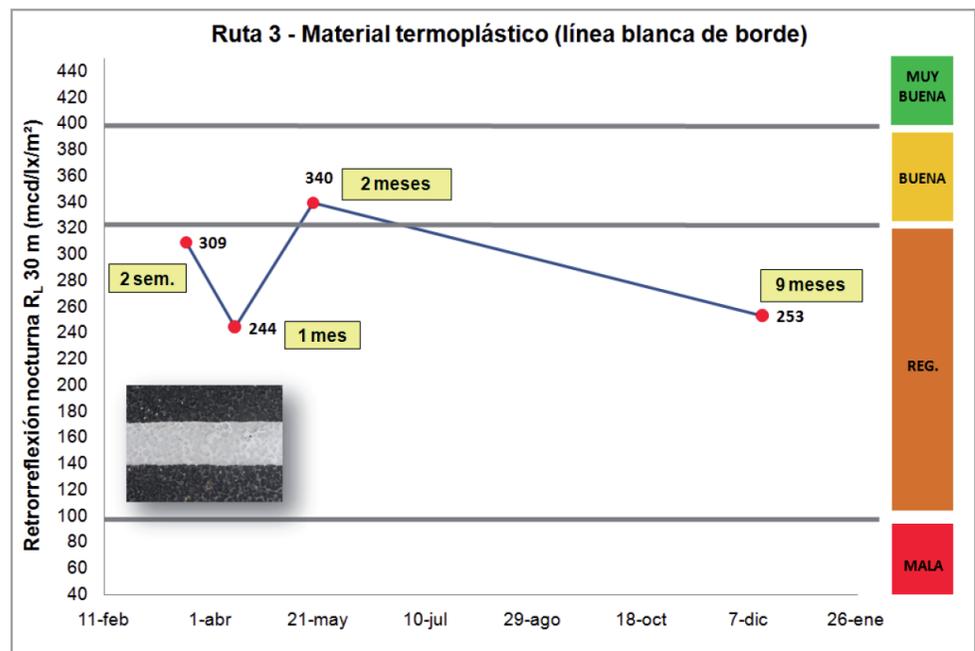
Tabla 9.7. Prueba estadística t para comparación de medias, tramo LanammeUCR.

Prueba estadística t	
$S_{AB} =$	29,411
$t_{exp} =$	1,537
t_t (2 colas)	1,978
$t_{exp} > t_t$	NO

9.5 ANÁLISIS DE LA RUTA 3 (HEREDIA-ALAJUELA)

En el caso de la Ruta 3, la cual conecta Heredia con Alajuela, se llevaron a cabo mediciones de retrorreflexión hasta 9 meses después de la demarcación del tramo con material termoplástico. El monitoreo se realizó en 4 fechas diferentes con equipo manual. El detalle de las mediciones de retrorreflexión y estadísticas descriptivas se encuentra en el Anexo B.

En la siguiente figura se observan los resultados para la línea blanca de borde. Las primeras tres mediciones muestran un desempeño entre regular y bueno; sin embargo, los valores distan significativamente del valor mínimo de desempeño de 400 mcd/m²/lx al inicio de la vida útil de la demarcación.



Figuras 9.9

Retrorreflexión con equipo manual de línea blanca de borde, Ruta 3.

Evaluando la doble línea amarilla continua, se obtienen los siguientes resultados, en el sentido Alajuela - Heredia y en el sentido Heredia - Alajuela (Figura 9.10).

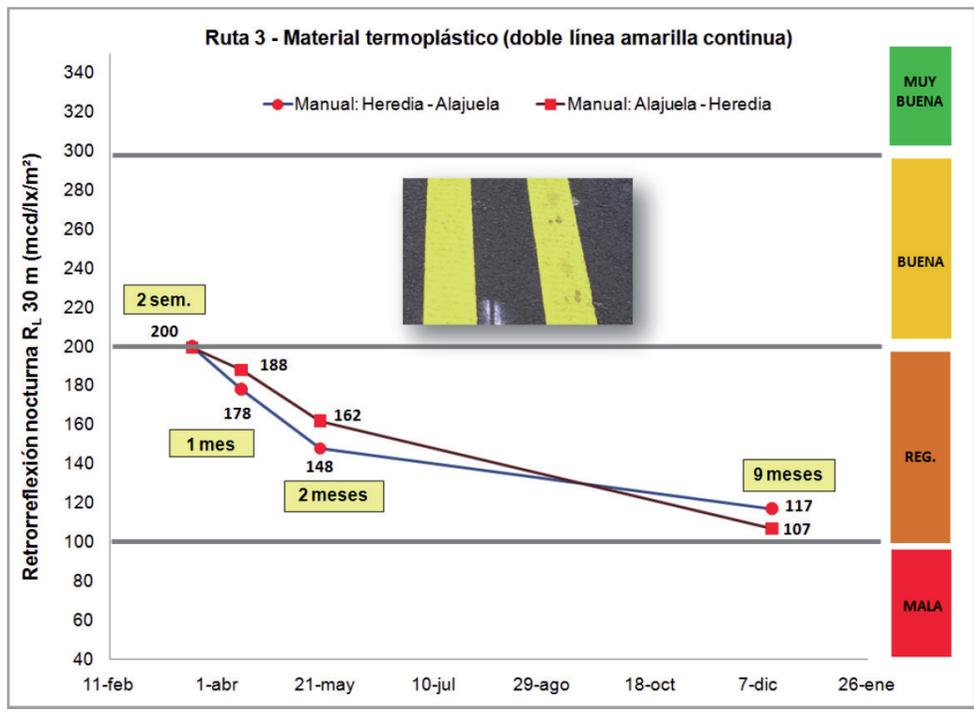


Figura 9.10

Retroreflexión con equipo manual de línea amarilla de centro, Ruta 3.

De este gráfico se pueden analizar varios aspectos importantes:

- Cuando se evalúa retroreflexión con equipo manual se evalúa únicamente en una dirección la línea amarilla más cercana al paso de los vehículos (en caso de doble línea amarilla). Los resultados muestran que se obtuvo en ambas direcciones un valor de retroreflexión inicial a las dos semanas de 200 mcd/m²/lx; es decir, justo en el límite entre las categorías buena y regular. El resto de las mediciones se mantuvieron en una categoría de desempeño regular. Si bien es cierto que a los 9 meses aún los valores se encontraban por encima del mínimo de 100 mcd/m²/lx, esto no se considera como un desempeño aceptable con respecto a la durabilidad del material termoplástico en general.

Es importante además evaluar las diferencias entre el procedimiento en campo utilizado para demarcar líneas y aquel para demarcar flechas, letras y figuras. En el caso del material termoplástico la diferencia no es tan significativa que en el caso de la aplicación de pintura base agua o base solvente, tal como se analizará con los resultados de la Ruta 110.

En la siguiente figura se muestra la retroreflexión para línea blanca de borde y para las flechas y rótulos de "60 KPH" de color blanco, en material termoplástico. De este gráfico se puede concluir que no hay diferencias significativas entre la demarcación de líneas, flechas y rótulos, con materia termoplástico. Llama la atención que en las mediciones a los 9 meses los promedios para la línea de borde sean mayores que para las flechas y los rótulos, ya que el desgaste tiende a ser mayor en

la demarcación que queda más expuesta al paso constante del tránsito; es decir, en la huella de los vehículos. Sin embargo, dada la aleatoriedad de las mediciones, no se puede concluir al respecto en este caso particular.

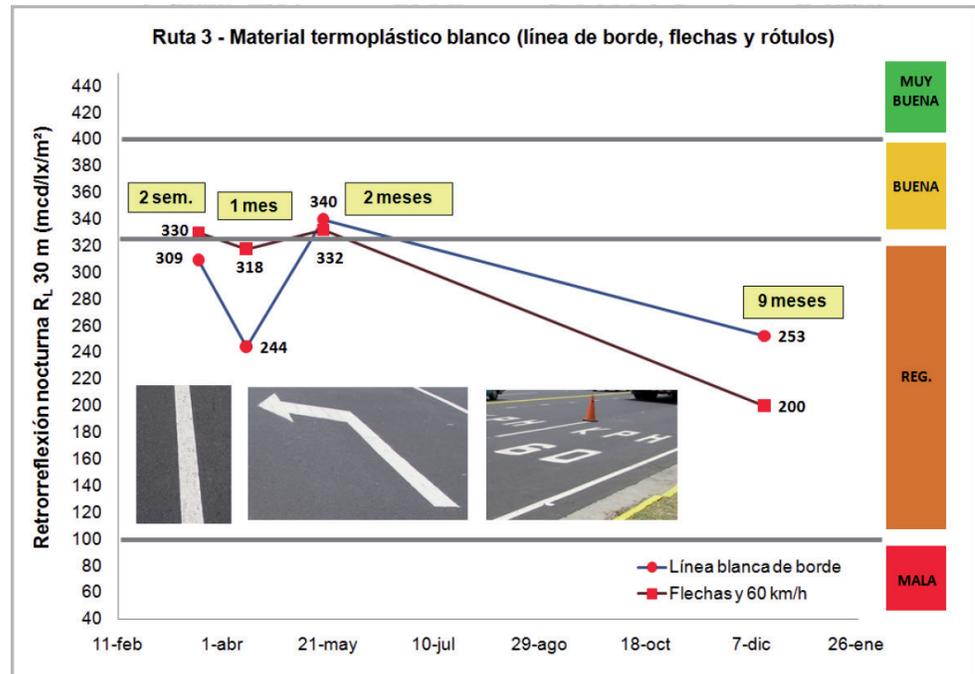


Figura 9.11

Retroreflexión con equipo manual de líneas blancas, figuras y rótulos, Ruta 3.

9.6 ANÁLISIS DE LA RUTA 110 (RADIAL ALAJUELITA)

La ruta 110 es conocida como la radial de Alajuelita, y se analizó el tramo de la Clínica Dr. Solón Núñez a la Corporación Numar. La doble línea amarilla de centro también se evaluó en las dos direcciones. Las mediciones se hicieron con el equipo manual en fechas similares a la ruta 3; es decir, hasta 9 meses después de la demarcación de la ruta. Sin embargo, en esta ruta la demarcación se llevó a cabo con pintura base solvente (alquídica). Con equipo manual el monitoreo se realizó 1 semana, 1 mes, 2 meses y 9 meses después de la demarcación. Para mayor detalle sobre las mediciones, referirse al Anexo C.

La siguiente figura muestra los resultados de retroreflexión para la línea blanca de borde:

Las mediciones a 1 semana muestran satisfactoriamente un desempeño muy bueno de casi 300 mcd/m²/lx. Al mes y a los dos meses después de haberse realizado la demarcación, aún los promedios se encontraban por encima de 200 mcd/m²/lx; es decir, en la categoría "muy buena". Finalmente, el valor de retroreflexión a los 9 meses de 95 mcd/m²/lx (con equipo manual) es coherente con las demás mediciones. Generalmente en el país se le ha exigido a este tipo de pintura una durabilidad mínima de 6 meses, lo cual se evidencia en esta ruta evaluada. Asumiendo un deterioro lineal (línea recta entre los 2 y los 9 meses), la demarcación se encontraba en un rango aún aceptable entre los 6 y 8 meses después de colocada, por encima del mínimo de 100 mcd/m²/lx.

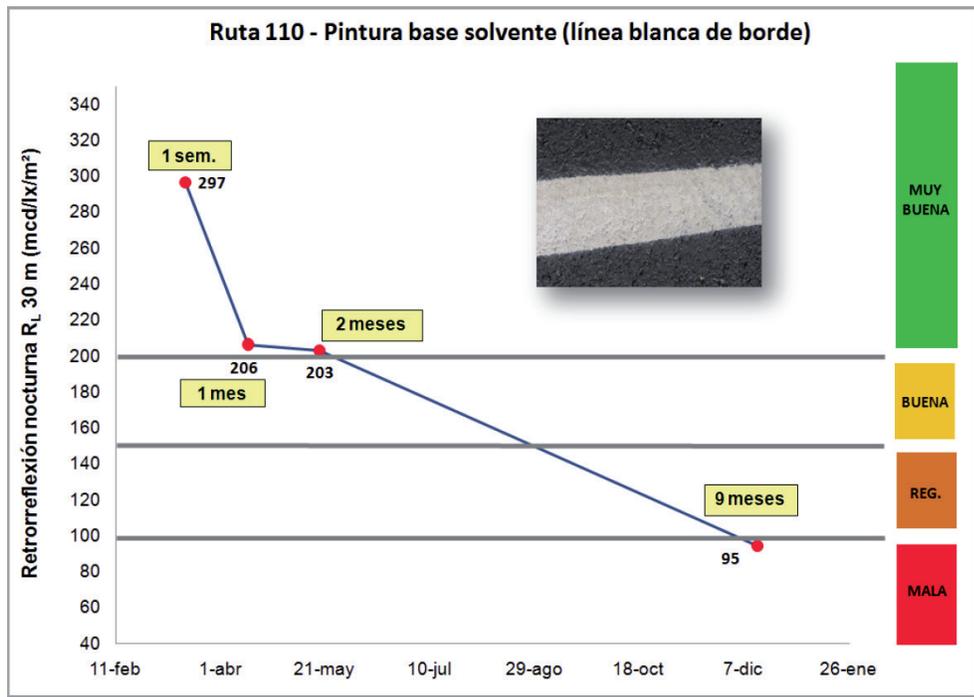


Figura 9.12

Retroreflexión con equipo manual de línea blanca de borde, Ruta 110.

Al igual que la ruta 3, se evaluó la doble línea amarilla en ambas direcciones: de la clínica hacia el cementerio y del cementerio a la clínica, con equipo manual (Figura 9.13).

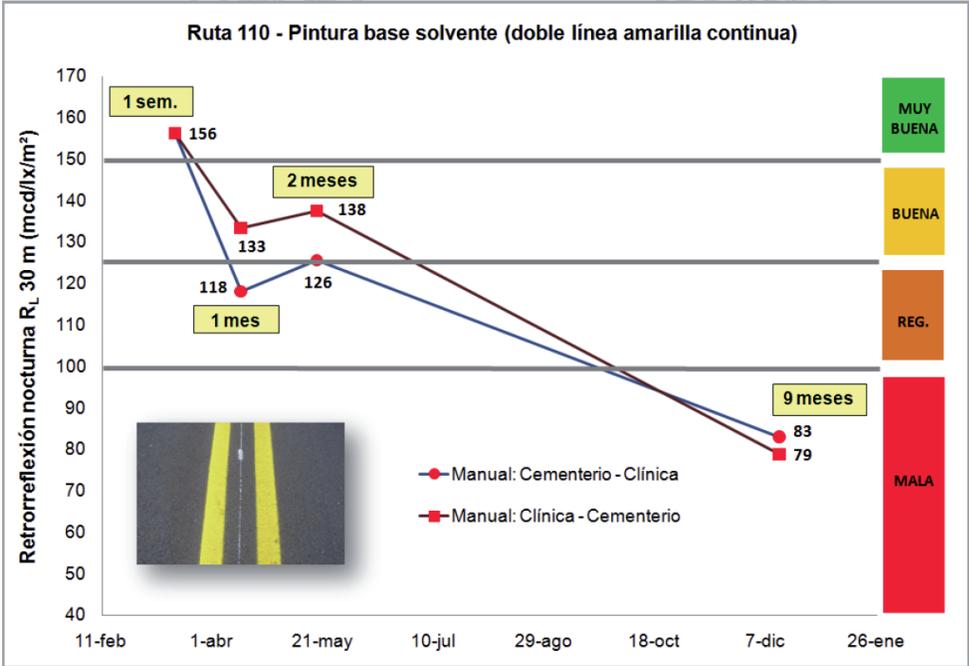


Figura 9.13

Retroreflexión con equipo manual de línea central amarilla, Ruta 110.

Los resultados muestran un comportamiento similar en ambas direcciones de la doble línea amarilla con pintura base solvente, iniciando con un muy buen desempeño de 156 mcd/m²/lx, para los resultados con equipo manual. Al mes y a los 2 meses las mediciones muestran una buena calidad de la demarcación. Siguiendo la tendencia, posiblemente cercano a los 6 meses se mantuvo en estado regular hasta caer por debajo del límite de 100 mcd/m²/lx.

Es importante además evaluar las diferencias entre el procedimiento utilizado para demarcar una línea con equipo automático (se regula espesor de línea y dosificación de microesferas) y la demarcadora manual para flechas, letras y figuras (microesferas arrojadas con la mano, mayor variabilidad). Sin embargo, como se muestra en la figura, no se observan diferencias significativas según los resultados de retroreflexión con equipo manual en esta ruta.

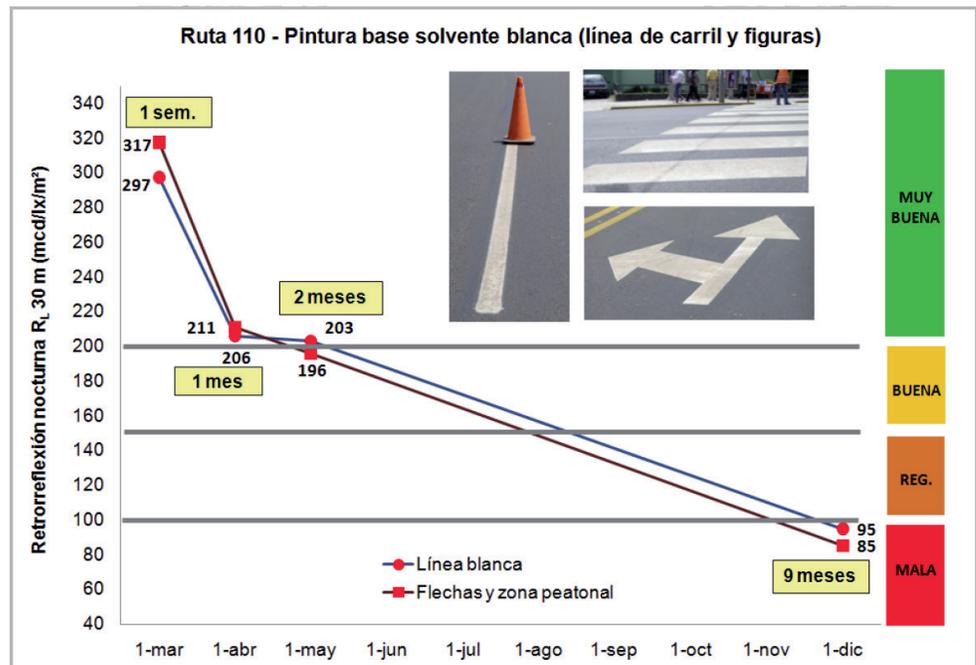


Figura 9.14

Retroreflexión con equipo manual de líneas blancas y figuras, Ruta 110.

9.7 ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE RUTAS Y MATERIALES

En esta sección se realiza un análisis comparativo considerando los siguientes aspectos:

- Para efectos de comparación, se toman las mediciones con el retrorreflectómetro manual en las rutas 3, 110 y en la ruta de prueba enfrente del LanammeUCR.
- Se comparan las pinturas base agua (ruta LanammeUCR) y base solvente (ruta 110) en doble línea amarilla continua. En la ruta de prueba enfrente del LanammeUCR únicamente se demarcó doble línea amarilla, por lo que no es posible comparar líneas, figuras ni rótulos con pintura de color blanco.
- Se compara la pintura base solvente (ruta 110) y el material termoplástico (ruta 3) en doble línea amarilla continua y en línea blanca.

Doble línea amarilla de centro: Pintura base agua vs. base solvente

En la Figura 9.15 se comparan las pinturas de tránsito base agua y base solvente, en el caso de doble línea amarilla de centro. El tramo de prueba enfrente del LanammeUCR fue demarcado con pintura base agua el 17 de febrero de 2012 y es una ruta de travesía de bajo tránsito, menor a los 10 000 vehículos por día (no hay datos precisos de TPD). Por su parte, la ruta 110 fue demarcada con pintura base solvente a inicios de marzo de 2012 y es una radial de tránsito medio de más de 20 000 vehículos por día. Para efectos de analizar el gráfico se debe considerar el desfase de aproximadamente 3 semanas entre la demarcación efectuada en las dos rutas.

Tal como se observa, la pintura base solvente presentó un valor de retrorreflexión inicial promedio de 157 mcd/m²/lx (condición muy buena) y al mes bajó a 118 mcd/m²/lx (condición regular). La pintura base agua presentó un mejor comportamiento inicial, manteniéndose entre 170 y 157 mcd/m²/lx durante los primeros 3 meses (condición muy buena); y al cuarto mes bajó a 131 mcd/m²/lx (condición buena).

Tomando en consideración ese desfase de 3 semanas, ambas pinturas llegaron al límite mínimo de 100 mcd/m²/lx aproximadamente al sexto mes de su vida útil, tal como se observa en el recuadro dentro del gráfico. Al noveno mes ya la pintura base solvente presentaba un promedio de retrorreflexión de 83 mcd/m²/lx, y al décimo mes la pintura base agua un promedio de 59 mcd/m²/lx. Es decir, se observa un comportamiento similar a lo largo de la vida útil con estos dos tipos de pintura. Se debe considerar, además, que la ruta 110 es de mayor tránsito, por lo que se podría asociar a un deterioro más acelerado de la demarcación en términos de retrorreflexión.

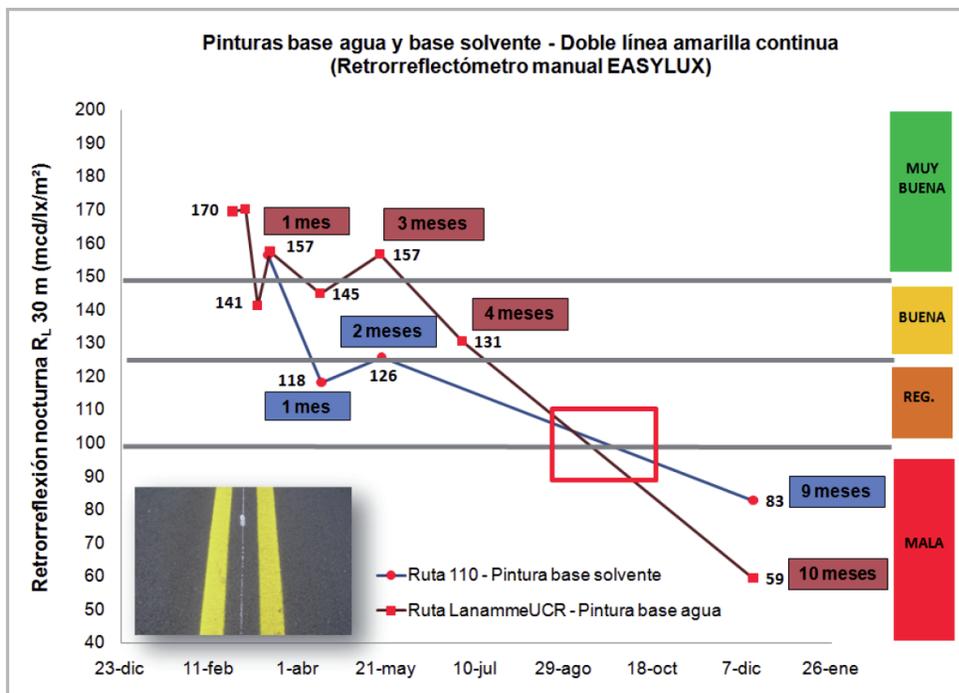


Figura 9.15

Comparación de retrorreflexión de pinturas base agua y base solvente.

Doble línea amarilla de centro: Termoplástico vs. pintura base solvente

En la Figura 9.16 se compara el material termoplástico (ruta 3) y la pintura base solvente (ruta 110), en el caso de doble línea amarilla de centro. Las mediciones fueron realizadas en las mismas fechas, y ambos tramos se encontraban en proceso de demarcación a inicios del mes de marzo de 2012. En cuanto al tránsito, en el año 2012 el TPD registrado para la ruta 110 fue de 20 982 vehículos por día, y para la ruta 3 fue de 22 872 vpd; es decir, rutas con volúmenes vehiculares similares. Como dato adicional, para el año 2013 el TPD reportado para la ruta 3 fue de 28 029 vpd; es posible que este incremento significativo se deba al proyecto de ampliación y mejoramiento de dicha ruta, lo cual aumentó la capacidad de la vía y, por ende, atrajo más vehículos una vez que se finalizaron los trabajos.

En cuanto a los resultados entre ambos materiales, se observa comparativamente un mejor comportamiento de la pintura base solvente que del material termoplástico, considerando su respectiva clasificación de retrorreflexión. La pintura base solvente comenzó con un valor promedio muy bueno (156 mcd/m²/lx) y se mantuvo en condición regular durante los primeros 6 meses de su vida útil, hasta llegar a 81 mcd/m²/lx a los 9 meses, por debajo del límite de 100 mcd/m²/lx. Por su parte, el espectro de retrorreflexión del material termoplástico es mucho más amplio que para las pinturas de tránsito; sin embargo, los valores oscilaron entre 200 y 112 mcd/m²/lx durante los primeros 9 meses de su vida útil. Si bien es cierto aún 112 mcd/m²/lx es aceptable (categoría regular), ya se encuentra muy cercano al límite mínimo de 100 mcd/m²/lx, lo cual no evidencia la durabilidad esperada de este material, aún desde las mediciones de retrorreflexión inicial.

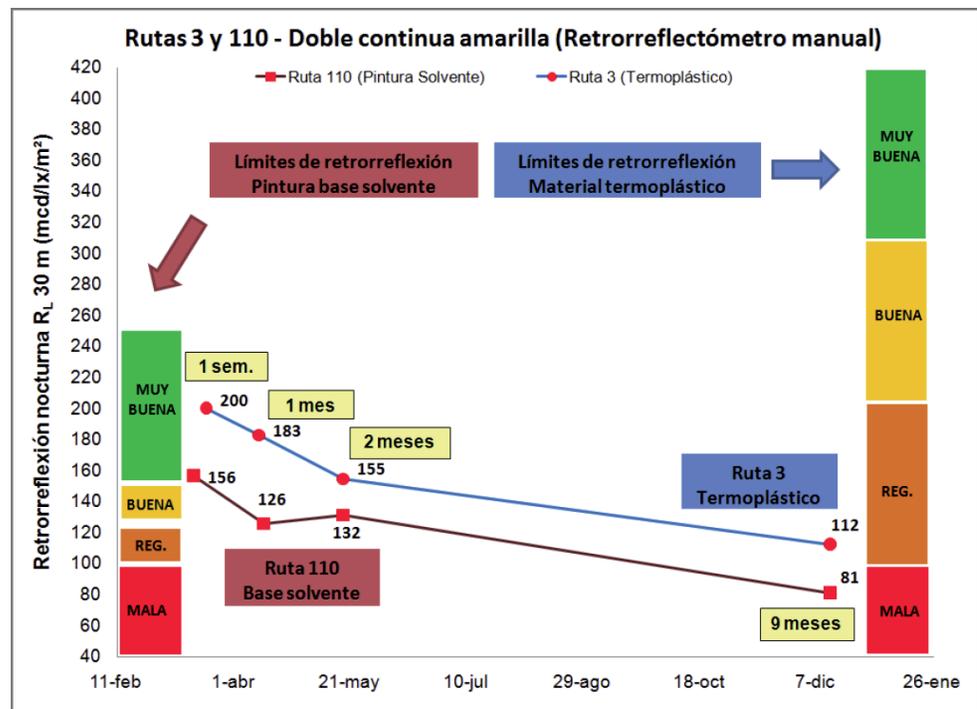


Figura 9.16

Comparación de retrorreflexión de termoplástico y base solvente, línea amarilla.

Línea blanca: Termoplástico versus pintura base solvente

Finalmente, en la Figura 9.17 se comparan las mismas rutas 3 y 110, pero en línea de color blanco. Se esperan valores mayores de retrorreflexión ya que el color blanco es el que mejor refleja la luz en toda la gama de colores, indistintamente del material que se utilice.

Tal como se observa, la pintura blanca base solvente tuvo un comportamiento en categorías muy buena y buena durante los primeros 6 meses de su vida útil, y no fue hasta casi los 9 meses después de su colocación que bajó de 100 mcd/m²/lx. En el caso del material termoplástico blanco, se obtuvo en promedio un buen desempeño bueno, con un promedio máximo de 340 mcd/m²/lx y un promedio mínimo de 253 mcd/m²/lx a los 9 meses después de colocada.

Estos resultados muestran en términos generales un mejor desempeño de la demarcación en color blanco, ya sea con pintura base solvente o material termoplástico, de acuerdo con la clasificación respectiva de niveles de retrorreflexión.

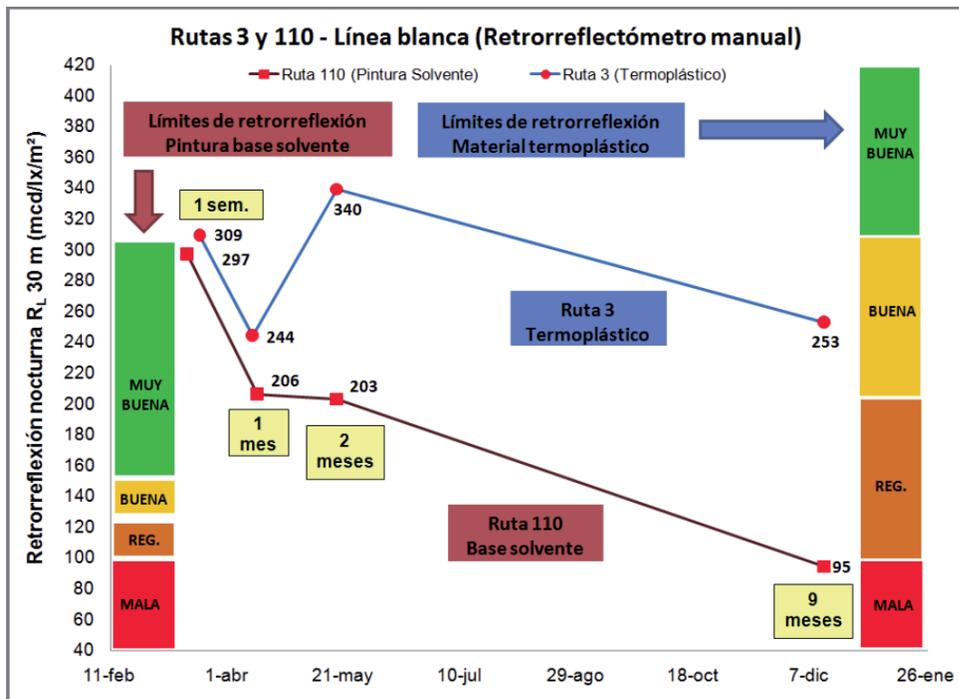


Figura 9.17

Comparación de retrorreflexión de termoplástico y base solvente, línea blanca.

9.8 MODELOS EMPÍRICOS DE RETRORREFLEXIÓN

En esta sección se muestran algunos modelos empíricos de retrorreflexión que se obtuvieron a partir de las mediciones con equipo manual, en la ruta enfrente del LanammeUCR, y en las rutas 3 y 110. Este análisis corresponde a una muestra pequeña de datos y de rutas evaluadas; por lo tanto, no se recomienda el uso de estas curvas para pronosticar la durabilidad de los diferentes materiales, ya que se podrían hacer estimaciones erróneas. Además, no se están considerando en estos modelos

CURVAS DE RETRORREFLEXIÓN PARA PINTURA BASE AGUA Y SOLVENTE

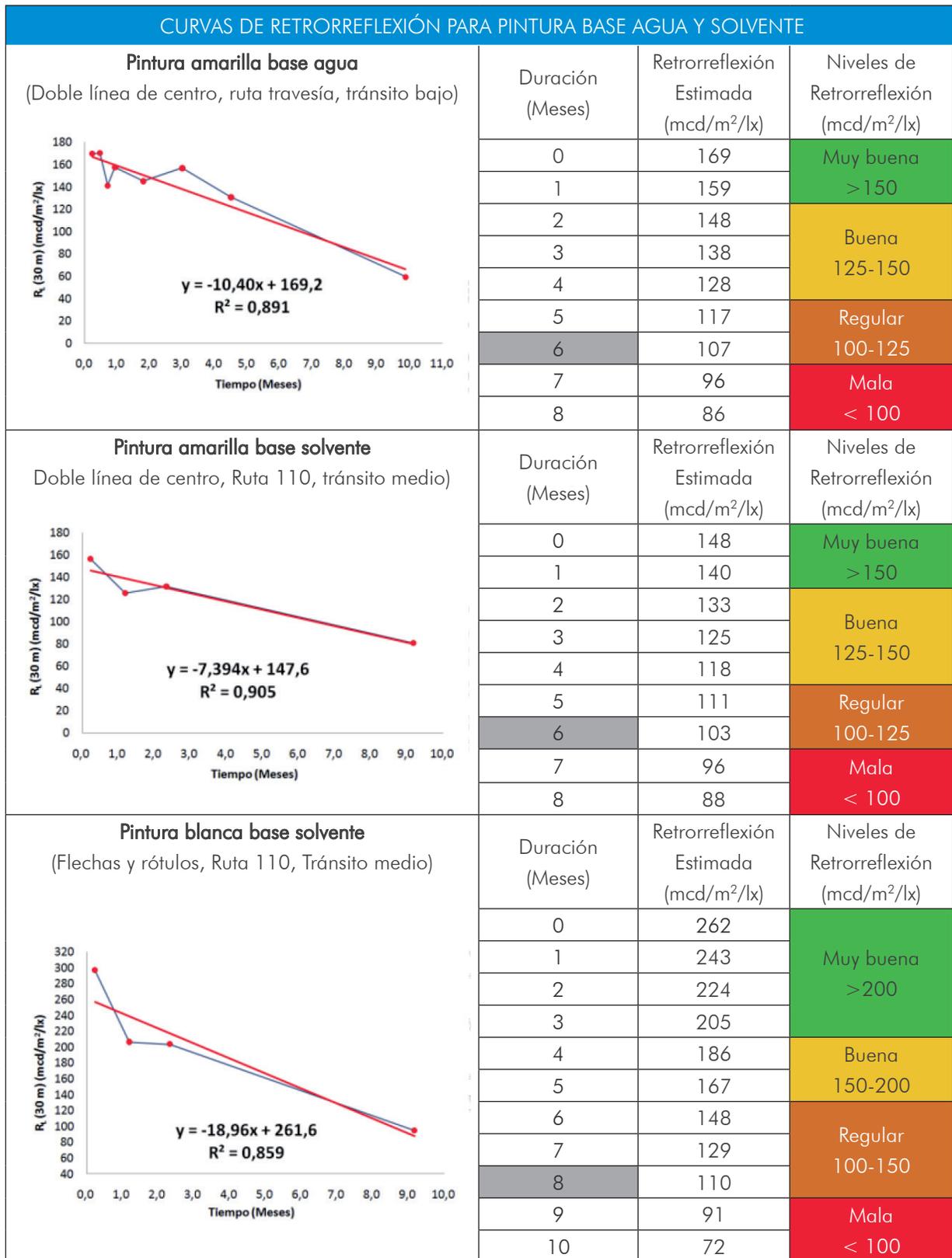


Figura 9.18

Curvas de mejor ajuste para pintura base agua y base solvente.

factores influyentes, tal como el clima, los volúmenes vehiculares, la sección transversal de la vía, ni el proceso de demarcación como tal. El fin de estos modelos es, por lo tanto, comenzar a generar conocimiento en cuanto al desempeño de los materiales de demarcación vial horizontal, y servir de punto de partida para futuros proyectos, a partir de los cuales se generen modelos multivariantes que sean representativos de diversas condiciones en el país. En la Figura 9.18 se muestran los modelos obtenidos para pinturas base agua y base solvente.

Tal como se observa en la figura anterior, se podría estimar una durabilidad para pintura amarilla ya sea base agua o base solvente de 6 meses como mínimo; mientras que la pintura blanca base solvente se podría estimar en 8 meses como mínimo, para un valor límite de retrorreflexión de 100 mcd/m²/lx.

Para material termoplástico se obtienen los modelos que se muestran en la Figura 9.19. Estos resultados son menos concluyentes ya que el sistema de demarcación vial en campo no tuvo un

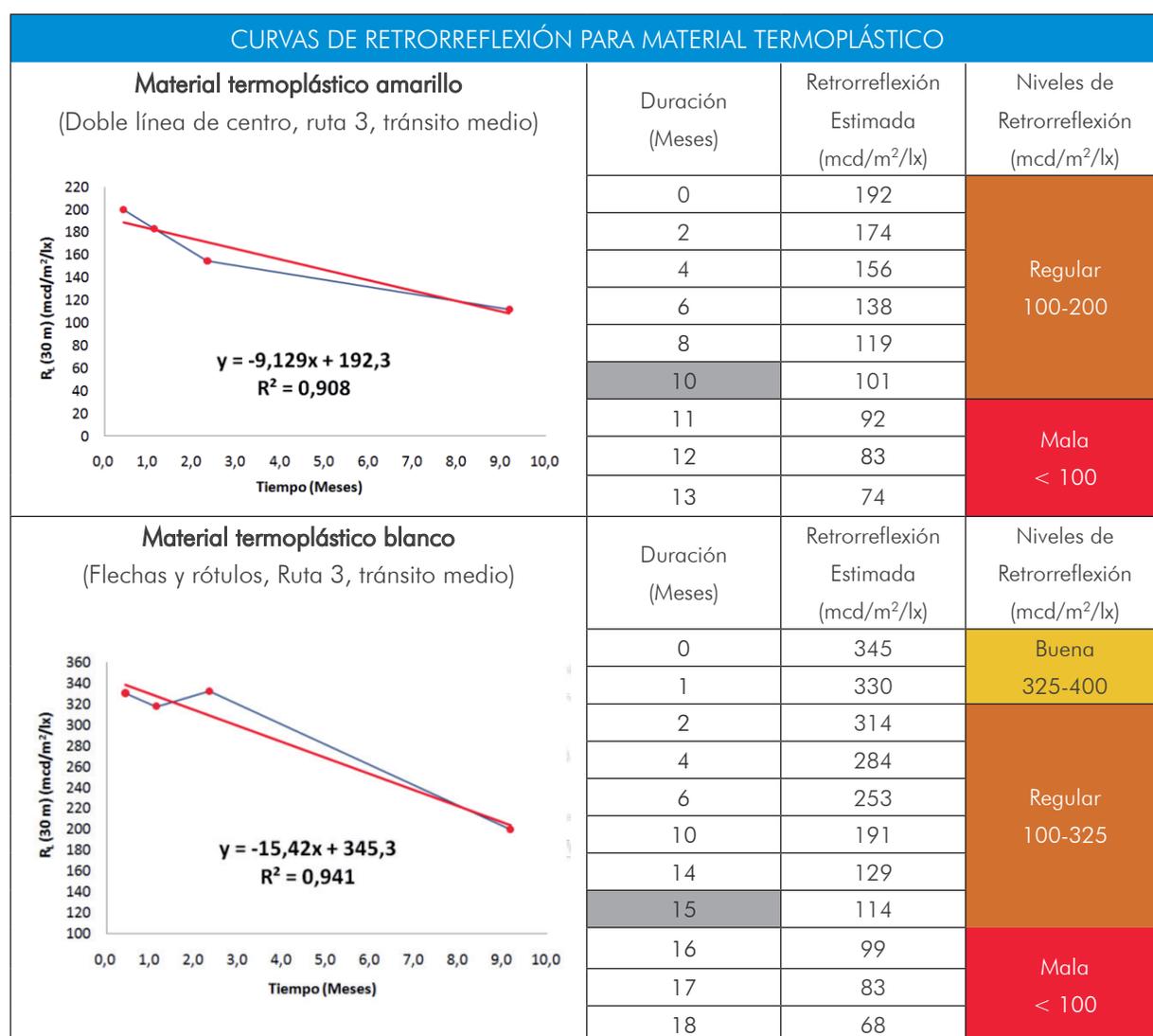


Figura 9.19

Curvas de mejor ajuste para material termoplástico.

comportamiento inicial aceptable. Pese a ello, se obtuvo una duración de 10 meses para el material termoplástico amarillo, y de 15 meses para el blanco.

En cuanto a las rectas de mejor ajuste, los coeficientes de determinación o cuadrado del coeficiente de correlación (R^2) oscilaron entre 0,859 y 0,941. Estos valores son cercanos a 1, lo cual indica que las rectas se ajustan bien a los datos; sin embargo, se debe considerar que las curvas fueron generadas únicamente a partir de 4 y 8 datos.

El Cuadro 9.8 resume los resultados de las curvas de mejor ajuste. A pesar de ser un análisis empírico basado en el monitoreo de retrorreflexión en 3 rutas específicas, los resultados concuerdan con la experiencia nacional e internacional en el tema de materiales de demarcación vial horizontal, mostrando que el material termoplástico tiene una durabilidad mayor a las pinturas de tránsito, y que el color blanco es más retrorreflectivo que el amarillo, por lo que su durabilidad será típicamente mayor ante un mismo límite de 100 mcd/m²/lx.

Tabla 9.8. Resultados de curvas de ajuste para retrorreflexión.

Resultados de curvas de ajuste para predicción de la retrorreflexión (mcd/m ² /lx)					
Duración (Meses)	Base Agua	Base Solvente	Base Solvente	Termoplástico	Termoplástico
	Amarilla	Amarilla	Blanca	Amarillo	Blanco
0	169	148	262	192	345
1	159	140	243	183	330
2	148	133	224	174	314
3	138	125	205	165	299
4	128	118	186	156	284
5	117	111	167	147	268
6	107	103	148	138	253
7	96	96	129	128	237
8	86	88	110	119	222
9	76	81	91	110	207
10	65	74	72	101	191
11	55	66	53	92	176
12	44	59	34	83	160
13	34	51	-----	74	145
14	-----	44	-----	64	129
15	-----	37	-----	55	114
16	-----	-----	-----	46	99
17	-----	-----	-----	37	83
18	-----	-----	-----	-----	68

10.1 CONCLUSIONES

La experiencia en Costa Rica en el uso de materiales de demarcación vial no ha sido ampliamente documentada, por lo que su desarrollo y aplicación han sido mayormente empíricos. Pese a ello, se han probado diferentes materiales a lo largo de las décadas, y por medio de la observación y la experiencia se ha podido ir conociendo su comportamiento en diferentes ambientes y bajo diversas condiciones. Algunas de estas lecciones aprendidas han llevado actualmente a una mejor escogencia del tipo de materiales a aplicar; sin embargo, no ha habido investigación en este campo que permita mejorar la calidad de los proyectos de demarcación vial horizontal, con un desempeño óptimo de los materiales. No es hasta años recientes que se vio la necesidad de contar con especificaciones en el tema de demarcación vial, tanto para la calidad de los materiales utilizados como para el desempeño del sistema, y así surgieron las normas de INTECO, tal como se mencionó al inicio del presente informe. Específicamente se desarrollaron normas para pintura base agua, pintura base solvente, material termoplástico y microesferas de vidrio. Adicionalmente, se elaboró la Guía de buenas prácticas para la demarcación vial horizontal. Estas normas están sujetas a cambios y actualizaciones acordes con la experiencia y los resultados de las investigaciones que se lleven a cabo.

La Unidad de Seguridad Vial y Transporte del PITRA-LanammeUCR dio inicio a la línea de investigación en el tema de materiales de demarcación vial horizontal, centrandó su interés en el desempeño y durabilidad de dichos materiales en Costa Rica, ante diversas condiciones. Al ser un proyecto ambicioso en cuanto a recolección de datos, y de frente a una gran diversidad de condiciones a lo largo de la red vial del país, se decidió desarrollar el proyecto en fases.

La primera fase, la cual se sintetiza en el presente documento, incluyó el estudio de 3 rutas de la zona central del país, de bajo y mediano volumen vehicular. Estas rutas fueron demarcadas con pintura base agua, pintura base solvente y material termoplástico. Al final de esta primera fase se llegó a las siguientes conclusiones:

Sobre la pintura base agua:

- El monitoreo de retroreflexión que se llevó a cabo en la ruta de travesía enfrente del LanammeUCR durante 10 meses muestra el desgaste que sufrió la pintura amarilla base agua (doble línea de centro) en una vía de bajo tránsito, con carriles angostos. Asumiendo un deterioro lineal de la demarcación vial, esta pintura tuvo un buen desempeño durante los primeros 3 meses, y luego

se aceleró su desgaste. Su vida útil se podría estimar en 6 meses, llegando a una retrorreflexión mínima de 100 mcd/m²/lx.

Sobre el material termoplástico:

- La Ruta 3 fue demarcada con material termoplástico, el cual se considera de alta durabilidad en climas con baja humedad y aplicado sobre pavimento en buen estado. Esta ruta tiene un tránsito medio y se monitoreó durante 9 meses. Los resultados muestran valores iniciales de retrorreflexión aceptables, pero en una categoría "regular", al menos considerando la mayor parte de las mediciones. Estos valores iniciales oscilaron entre 244 y 340 mcd/m²/lx para el blanco y entre 148 y 200 mcd/m²/lx para el amarillo.
- El material termoplástico blanco se mantuvo más estable a lo largo de los meses, y aún se encontraba en un rango entre 200 y 253 mcd/m²/lx a los 9 meses después de su aplicación; todavía con una vida útil remanente. Por su parte, el material termoplástico amarillo a los 9 meses había bajado a 107 - 117 mcd/m²/lx; es decir, muy cerca del mínimo aceptable de 100 mcd/m²/lx para cualquier material.
- No se observaron diferencias significativas entre el material termoplástico blanco aplicado en línea blanca y aplicado en flechas y rótulos. Diferencias mínimas observadas se deben mayormente al desgaste más acelerado de un material que se expone más al paso de los vehículos, principalmente vehículos pesados, tal como los buses.

Sobre la pintura base solvente:

- La Ruta 110 por su parte fue demarcada con pintura base solvente y se monitoreó durante 9 meses. Esta ruta es una radial de tránsito medio, de dos carriles por sentido, con alto flujo de vehículos pesados (principalmente buses), y motocicletas. Debido al estacionamiento de los vehículos a lo largo de la radial que obstaculizan parcialmente los carriles externos, obligan a los vehículos que circulan a cambiar constantemente de carril, principalmente los autobuses. El paso constante de los vehículos sobre la demarcación acelera su proceso de desgaste.
- La pintura base solvente blanca para línea de borde tuvo un buen desempeño en cuanto a su durabilidad. Durante los primeros dos meses se mantuvo con un muy buen desempeño, con valores entre 200 y 297 mcd/m²/lx. Luego tuvo un desgaste más acelerado y para los 9 meses se encontraba cercano al mínimo de 100 mcd/m²/lx. Esta misma pintura aplicada a las figuras tuvo un comportamiento muy similar al de la línea blanca de borde.
- La pintura base solvente amarilla en doble línea de centro también tuvo un buen desempeño, comenzando con valores de 156 mcd/m²/lx. A los 9 meses ya el material se encontraba por debajo del mínimo de 100 mcd/m²/lx, con promedios entre 79 y 83 mcd/m²/lx. Estos valores son congruentes con los resultados de la pintura base solvente blanca, ya que el color blanco es más retrorreflectivo que el amarillo.

Retroreflectómetro móvil vs. manual:

- En el caso de la ruta de travesía del LanammeUCR, se obtuvo valores de retroreflexión consistentes entre ambos equipos. Para ello se efectuó una prueba estadística, y se verificó que los valores no eran significativamente diferentes con un nivel de confianza del 95%.

Conclusiones finales:

- Se realizó un análisis comparativo entre rutas y materiales. En cuanto a las pinturas base agua y base solvente, se observa un desempeño muy similar, lo cual es congruente con la experiencia en el país y la experiencia internacional. Con base en curvas empíricas de mejor ajuste se estimó una durabilidad de la pintura amarilla de 6 meses y de la pintura blanca de 8 meses. Para el material termoplástico amarillo y blanco se estimó una durabilidad de 10 y 15 meses, respectivamente, manteniendo valores por encima de 100 mcd/m²/lx. Estos resultados son empíricos y no son congruentes con la durabilidad y el desempeño esperado del material termoplástico, tanto por la experiencia internacional, como por lo observado en campo en el país.
- A pesar de que el factor climático no se consideró como tal en el análisis, se observó en los resultados un desgaste más acelerado de los materiales entre mayo y octubre, los meses de lluvias más fuertes y frecuentes en el Valle Central. Esta tendencia se observó en la pintura base agua de la ruta de travesía enfrente del LanammeUCR, en el material termoplástico en la Ruta 3 y en la pintura base solvente en la Ruta 110.

10.2 RECOMENDACIONES

Con el fin de conocer mejor la calidad, desempeño y durabilidad de los diferentes materiales de demarcación vial horizontal utilizados en el país, se plantean una serie de recomendaciones, tanto para las siguientes fases de este proyecto como para ser consideradas por la Administración para sus proyectos de demarcación vial.

- Se recomienda dar continuación a la investigación en el tema de materiales de demarcación vial horizontal, con el fin de actualizar criterios, especificaciones y mejores prácticas en las normas nacionales. Estas actualizaciones son necesarias por un tema de costos y por el control de calidad de los trabajos llevados a cabo, buscando así optimizar el uso de los fondos públicos y mejorar la seguridad de la red vial.
- En cuanto a los límites de retroreflexión, se recomienda ampliar la muestra de rutas monitoreadas e incorporar diversos factores influyentes en el análisis, con el fin de proponer modificaciones a los límites ya establecidos en las normas vigentes de INTECO.
- Los principales factores que se deberán considerar en las siguientes fases de la investigación son: el factor climático, los volúmenes vehiculares, el porcentaje de vehículos pesados, el tipo y estado del pavimento, el control del proceso de demarcación (incluyendo la calidad de los materiales) y los anchos de carril (sección transversal de la vía). Se recomienda, por lo tanto, escoger una

muestra representativa de tramos de diversas rutas del país, que se ubiquen en diversas zonas climáticas, con diferentes niveles de tránsito (bajo, medio y alto), con diferente sección transversal (número de carriles y ancho de carril), tanto en pavimentos nuevos como en superficies con cierto nivel de deterioro.

- Dados los resultados de esta primera fase de la investigación, se recomienda darle prioridad al análisis de mediciones de retrorreflexión de líneas blancas y amarillas demarcadas con los tres materiales: pintura base agua, pintura base solvente y material termoplástico. En forma opcional se podrán analizar también figuras, rótulos y cualquier otro diseño de demarcación vial horizontal, si se considerara conveniente para efectos comparativos.
- Se recomienda profundizar en la literatura investigada para esta primera fase del proyecto, con el fin de considerar la experiencia internacional en el tema del desempeño de los materiales de demarcación vial horizontal. Varios investigadores estadounidenses han propuesto valores de retrorreflexión para diferentes tipos de vía (de baja y alta velocidad), los cuales son variables dependiendo de si hay presencia de captaluces o no. Por ejemplo, se han establecido valores bajos hasta de 30 mcd/m²/lx para pintura blanca o amarilla con presencia de captaluces, para carreteras con velocidad permitida menor o igual a 65 km/h; y se han establecido valores altos hasta de 150 mcd/m²/lx para pintura blanca sin captaluces, para autopistas con velocidad permitida mayor a 90 km/h. En Costa Rica, el uso de captaluces es indispensable dadas las condiciones de la red vial, principalmente la topografía del terreno, la sección transversal de la vía y las condiciones climáticas adversas, por lo que más bien debe ser obligatorio el uso de estos dispositivos; sin embargo, se podrían considerar diferentes niveles de retrorreflexión dado el tipo de carretera, su velocidad máxima permitida y su estándar de diseño.
- Se recomienda la comparación de mediciones de retrorreflexión realizadas con diferentes equipos de marcas distintas (manuales y móviles), con el fin de comprobar la validez de los datos. Esto es particularmente importante para efectos del control de calidad y de la aceptación de los proyectos de demarcación vial horizontal en el país, así como para la fiscalización de la red vial. Actualmente la Administración cuenta con retrorreflectómetros manuales de una marca distinta al del LanammeUCR, por lo que se recomienda realizar mediciones con ambos equipos y hacer un análisis comparativo. En principio las diferencias esperadas deberían ser mínimas (no significativas estadísticamente) ya que cualquier retrorreflectómetro manual se fabrica siguiendo las especificaciones de la norma estadounidense ASTM E1710, para una geometría estándar de 30 m y una misma unidad de medición de retrorreflexión: milicandelas por metro cuadrado, por lux (mcd/m²/lx).

AEN/CTN 135 – Equipamiento para la Señalización Vial, 2007. Materiales para señalización vial horizontal. Comportamiento de las marcas viales aplicadas sobre la calzada (EN 1436:2007).

Aktan y Schnell (2004). Performance evaluating of pavement markings under dry, wet, and rainy conditions in the field. Minnesota.

Congreso Iberoamericano de Seguridad Vial (CISEV), 2010. Edelmuth, A. Materiales para demarcación horizontal en nuestra región.

Debaillon, C., Carlson, P., He, Y., Schnell, T. and Aktan, F. (2007). Updates to Research on Recommended Minimum levels for Pavement Marking Retroreflectivity to Meet Driver Night Visibility Needs. Preparado para Turner-Fairbank Highway Research Center. Preparado por University of Iowa y Texas Transportation Institute. Informe FHWA-HRT-07-059. McLean, VA, Estados Unidos.

Departamento de transportes de Estados Unidos USDOT, Administración federal de autopistas FHWA (2007). Updates to research on recommended minimum levels for pavement marking retroreflectivity to meet driver night visibility needs. (Informe número: FHWAT-HRT-07-059). Virginia: Departamento de transportes de los Estados Unidos.

Federal Highway Administration FHWA (2003). Manual on Uniform Traffic Control Devices. Estados Unidos.

Filice, J. (2003). Study of Waterborne Highway Traffic Paint. Preparado para Alberta Transportation, Technical Standards Branch. Preparado por IBIS Products Ltd., Rohm and Haas Co., y Lafrentz Road Services Ltd. Edmonton, AB, Canada.

Florida Department of Transportation (FDOT), 2010. Standard Specifications for Road and Bridge Construction.

Hawkins, H. G., Pratt, M. and Carlson, P. J. (2008). Preliminary Economic Impacts of Implementing Minimum Levels of Pavement Marking Retroreflectivity. Preparado para Federal Highway Administration FHWA. Preparado por Texas Transportation Institute y Battelle. Informe FHWA-SA-08-010. Washington D.C.

Hollingsworth. (2012). Understanding the impact of bead type on paint and thermoplastic pavement markings. Ohio: Instituto de Tecnología de la Fuerza Aérea.

Holzschuher, Choubane, Fletcher, Sevearance y Lee. (2010). Repeatability of mobile retroreflectometer unit for measurement of pavement markings.

Hummer, J., Rasdorf, W. y Zhang, G. (2011). Linear mixed – effects models for paint pavement – marking retrorreflectivity data. Carolina del Norte: ASCE.

Instituto de Transportes de Texas TxDOT (2008). Preliminary economic impacts of implementing minimum levels of pavement marking retroreflectivity. (Informe número: FHWA-SA-08-010). Texas: Battelle.

Kopf, J. (2004). Reflectivity of pavement markings: Analysis of retroreflectivity degradations curves. Washington: Comisión de transporte del estado de Washington.

Ministerio de Obras Públicas y Transportes MOPT (2012). Anuario de información de tránsito 2012. Dirección de Planificación Sectorial, Unidad de Gestión de Carreteras. San José, Costa Rica.

Ministerio de Obras Públicas y Transportes MOPT (2013). Anuario de información de tránsito 2013. Dirección de Planificación Sectorial, Unidad de Gestión de Carreteras. San José, Costa Rica.

Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones (MTT), 2001. Manual de Señalización de Tránsito: Demarcaciones. Chile.

Ministerios de Obras Públicas de España, 1999. Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes.

Orozco, E. G. (2007). Zonificación climática de Costa Rica para la gestión de infraestructura vial. Informe de proyecto de graduación, Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.

PITRA-LanammeUCR (2011). Identificación de zonas de riesgo de accidentes Rutas 1, 2, 32 y 34. Preparado por la Unidad de Evaluación y Gestión de la Red Vial Nacional. Proyecto LM-PI-UE-009-2011. San José, Costa Rica.

Rasdorf, W., Hummer, J., Zhang, G. y Sitzabee, W. (2009). Pavement marking performance analysis. Carolina del Norte: Departamento de transporte de Carolina del Norte.

Rasdorf, Zhang y Hummer. (2009). The impact of irectionality on paint pavement marking retroreflectivity. (Informe número: 10.1177/1087724x08330824). Carolina del Norte: Sage.

Robertson, J., Sarasua, W., Jonhson, J. y Davis, W. (2012). A methodology for estimating and comparing the lifecycles of high – build and conventional waterborne pavement markings on primary and secondary roads in South Carolina. Carolina del Sur: SAGE.

Sanhueza, M. y Riveros, M. A. (2006). Un método estadístico de aceptación y rechazo en la

demarcación vial horizontal aplicada a la medición de retrorreflectancia. Laboratorio Nacional de Vialidad, Ministerio de Obras Públicas MOP, Gobierno de Chile. Santiago, Chile.

Sarasua W, Davis W, Robertson J y Jonhson J. (2013). A methodology for evaluating centerline markings in template climates. *Revista de transporte del Instituto de Ingenieros en Transporte*, 17-30.

Sasidharan, Karwa, y Donnell (2009). *Use of pavement marking degradation models to develop a pavement marking management system*. Pennsylvania: Sage.

Secretaría de Integración Económica de Centroamérica (SIECA), 2000. *Manual Centroamericano de Dispositivos Uniformes para el Control de Tránsito*.

Thamizharasan, A., Sarasua, W. y Clarke, D. (2002). A methodology for estimating the lifecycle of interstate highway pavement marking retroreflectivity. (Informe número 03-3867) Carolina del Sur: TRB.

Tsyganov, Machemehl, Warrenchuck y Wang (2006). *Before – After comparison of edgeline effects on rural two – lane highways*. Texas: Departamento de Transporte de Texas.

Wilmot y Fu (2012). *Evaluating alternative pavement marking materials*. (Informe número: 10.1177/1087724x12451844). Louisiana: Sage.

Zhang, G., Hummer, J. y Rasdorf, W. (2009). *Impact of bead density on paint pavement marking retroreflectivity*. Carolina del Norte: ASCE.

ANEXO A: DATOS DE RETRORREFLEXIÓN RUTA DE PRUEBA LANAMMEUCR

RETRORREFLECTÓMETRO MANUAL EASYLUX
(en unidades mcd/m²/lx)

Cuadro A-1		Ubicación	Entrada LanammeUCR - Hacia el este
Fecha	17/02/2012	Línea / figura	Continuas (AMARILLO)
Estadística	R _L (15 m)	R _L (30 m)	Q _D
Máximo	472	278	144
Mínimo	377	227	122
Media	426,66	253,66	129,66
Desv. Estándar	34,11	22,74	8,21

Cuadro A-2		Ubicación	Entrada LanammeUCR - Hacia el oeste
Fecha	17/02/2012	Línea / figura	Continuas (AMARILLO)
Estadística	R _L (15 m)	R _L (30 m)	Q _D
Máximo	444	282	145
Mínimo	399	219	126
Media	421,75	248	134,87
Desv. Estándar	18,68	18,83	7,60

Cuadro A-3		Ubicación	Entrada LanammeUCR - Hacia el este
Fecha	24/02/2012	Línea / figura	Continuas (AMARILLO)
Estadística	R _L (15 m)	R _L (30 m)	Q _D
Máximo	373	233	83
Mínimo	286	154	51
Media	321,93	186,18	65,25
Desv. Estándar	27,61	20,33	9,21

Cuadro A-4		Ubicación	Entrada LanammeUCR - Hacia el oeste
Fecha	24/02/2012	Línea / figura	Continuas (AMARILLO)
Estadística	R _L (15 m)	R _L (30 m)	Q _D
Máximo	340	195	80
Mínimo	167	103	44
Media	277,05	152,83	64,33
Desv. Estándar	38,01	23,97	10,38

RETROREFLECTÓMETRO MANUAL EASYLUX
(en unidades mcd/m²/lx)

Cuadro A-5		Ubicación	Entrada LanammeUCR - Hacia el este
Fecha	02/03/2012	Línea / figura	Continuas (AMARILLO)
Estadística	R _L (15 m)	R _L (30 m)	Q _D
Máximo	358	213	77
Mínimo	245	151	44
Media	299,56	175,06	62,81
Desv. Estándar	28,54	18,59	8,02

Cuadro A-6		Ubicación	Entrada LanammeUCR - Hacia el oeste
Fecha	02/03/2012	Línea / figura	Continuas (AMARILLO)
Estadística	R _L (15 m)	R _L (30 m)	Q _D
Máximo	371	231	81
Mínimo	118	131	47
Media	284,88	165,16	70,66
Desv. Estándar	51,73	26,45	7,34

Cuadro A-7		Ubicación	Entrada LanammeUCR - Hacia el este
Fecha	09/03/2012	Línea / figura	Continuas (AMARILLO)
Estadística	R _L (15 m)	R _L (30 m)	Q _D
Máximo	300	190	64
Mínimo	202	124	44
Media	246,31	151,87	51,68
Desv. Estándar	26,89	19,38	6,98

Cuadro A-8		Ubicación	Entrada LanammeUCR - Hacia el oeste
Fecha	09/03/2012	Línea / figura	Continuas (AMARILLO)
Estadística	R _L (15 m)	R _L (30 m)	Q _D
Máximo	260	160	62
Mínimo	26	99	42
Media	203,05	130,5	53
Desv. Estándar	48,51	16,72	6,24

RETROREFLECTÓMETRO MANUAL EASYLUX
(en unidades mcd/m²/lx)

Cuadro A-9		Ubicación	Entrada LanammeUCR - Hacia el este
Fecha	16/03/2012	Línea / figura	Continuas (AMARILLO)
Estadística	R _L (15 m)	R _L (30 m)	Q _D
Máximo	326	198	68
Mínimo	202	136	46
Media	270,25	170,37	57,31
Desv. Estándar	32,76	16,07	6,81

Cuadro A-10		Ubicación	Entrada LanammeUCR - Hacia el oeste
Fecha	16/03/2012	Línea / figura	Continuas (AMARILLO)
Estadística	R _L (15 m)	R _L (30 m)	Q _D
Máximo	273	184	63
Mínimo	0	94	42
Media	216,83	144,55	54,77
Desv. Estándar	60,61	22,78	6,61

Cuadro A-11		Ubicación	Entrada LanammeUCR - Hacia el este
Fecha	13/04/2012	Línea / figura	Continuas (AMARILLO)
Estadística	R _L (15 m)	R _L (30 m)	Q _D
Máximo	310	202	62
Mínimo	222	116	37
Media	249,75	156,25	48,62
Desv. Estándar	25,78	20,18	6,32

Cuadro A-12		Ubicación	Entrada LanammeUCR - Hacia el oeste
Fecha	13/04/2012	Línea / figura	Continuas (AMARILLO)
Estadística	R _L (15 m)	R _L (30 m)	Q _D
Máximo	405	277	163
Mínimo	0	100	35
Media	202,77	133,72	48,27
Desv. Estándar	72,54	39,61	26,86

RETROREFLECTÓMETRO MANUAL EASYLUX
(en unidades mcd/m²/lx)

Cuadro A-13		Ubicación	Entrada LanammeUCR - Hacia el este
Fecha	17/05/2012	Línea / figura	Continuas (AMARILLO)
Estadística	R _L (15 m)	R _L (30 m)	Q _D
Máximo	309	195	162
Mínimo	44	130	32
Media	245,25	159,75	63,12
Desv. Estándar	63,36	22,12	27,78

Cuadro A-14		Ubicación	Entrada LanammeUCR - Hacia el oeste
Fecha	17/05/2012	Línea / figura	Continuas (AMARILLO)
Estadística	R _L (15 m)	R _L (30 m)	Q _D
Máximo	287	200	63
Mínimo	0	122	44
Media	210,05	153,66	53,27
Desv. Estándar	69,72	23,51	5,59

Cuadro A-15		Ubicación	Entrada LanammeUCR - Hacia el este
Fecha	02/07/2012	Línea / figura	Continuas (AMARILLO)
Estadística	R _L (15 m)	R _L (30 m)	Q _D
Máximo	295	169	74
Mínimo	60	92	47
Media	214,50	134,25	56,06
Desv. Estándar	58,76	24,06	7,17

Cuadro A-16		Ubicación	Entrada LanammeUCR - Hacia el oeste
Fecha	02/07/2012	Línea / figura	Continuas (AMARILLO)
Estadística	R _L (15 m)	R _L (30 m)	Q _D
Máximo	245	154	59
Mínimo	153	90	35
Media	209,27	127,05	52,11
Desv. Estándar	27,40	21,23	8,15

RETROREFLECTÓMETRO MANUAL EASYLUX
(en unidades mcd/m²/lx)

Cuadro A-17		Ubicación	Entrada LanammeUCR - Hacia el este
Fecha	13/12/2012	Línea / figura	Continuas (AMARILLO)
Estadística	R _L (15 m)	R _L (30 m)	Q _D
Máximo	124	74	55
Mínimo	24	12	34
Media	74,40	46,18	43,29
Desv. Estándar	24,77	14,49	5,95

Cuadro A-18		Ubicación	Entrada LanammeUCR - Hacia el oeste
Fecha	13/12/2012	Línea / figura	Continuas (AMARILLO)
Estadística	R _L (15 m)	R _L (30 m)	Q _D
Máximo	183	117	62
Mínimo	71	42	39
Media	114,27	72,77	48,55
Desv. Estándar	33,15	22,00	6,428

RETROREFLECTÓMETRO MÓVIL LASERLUX
(en unidades mcd/m²/lx)

Cuadro A-19		Ubicación	LanammeUCR (Sentido oeste-este)
Fecha	02/07/2012	Línea / figura	Continuas (AMARILLO)
Datos originales			
Estadística	R _l Izq. Prom.	R _l Der. Prom.	R _l Promedio
Media	115,38	104,15	111,28
Máximo	181,59	185,46	183,52
Mínimo	11,31	0,00	12,31
Percentil 85	154,87	129,94	138,32
Desv. Estándar	28,02	22,69	39,10
Datos modificados			
Estadística	R _l Izq. Prom.	R _l Der. Prom.	R _l Promedio
Media	126,05	118,11	121,58
Máximo	181,59	185,46	183,52
Mínimo	72,84	70,61	74,14
Percentil 85	156,17	131,77	138,89
Desv. Estándar	26,95	27,01	25,54

Cuadro A-20		Ubicación	LanammeUCR (Sentido este-oeste)
Fecha	2/07/2012	Línea / figura	Continuas (AMARILLO)
Datos originales			
Estadística	R _l Izq. Prom.	R _l Der. Prom.	R _l Promedio
Media	114,20	109,56	112,07
Máximo	180,96	198,09	189,53
Mínimo	10,46	0,00	10,46
Percentil 85	146,99	141,32	142,07
Desv. Estándar	32,59	30,65	39,52
Datos modificados			
Estadística	R _l Izq. Prom.	R _l Der. Prom.	R _l Promedio
Media	125,58	117,14	123,09
Máximo	180,96	198,09	189,53
Mínimo	85,28	30,51	93,45
Percentil 85	147,63	144,08	144,24
Desv. Estándar	23,66	33,38	23,86

ANEXO B: DATOS DE RETRORREFLEXIÓN RUTA 3

RETRORREFLECTÓMETRO MANUAL EASYLUX (en unidades mcd/m²/lx)

Cuadro B-1		Ubicación	Servicentro San Joaquín
Fecha	20/03/2012	Línea / figura	Continua amarilla (Alaj - Her)
Estadística	R _L (15 m)	R _L (30 m)	Q _D
Máximo	316	254	137
Mínimo	206	142	99
Media	256,96	193,72	118,48
Desv. Estándar	29,54	30,29	10,64

Cuadro B-2		Ubicación	Servicentro San Joaquín
Fecha	20/03/2012	Línea / figura	Continua amarilla (Alaj - Her)
Estadística	R _L (15 m)	R _L (30 m)	Q _D
Máximo	352	241	144
Mínimo	162	134	89
Media	269,83	195,56	120,03
Desv. Estándar	35,72	26,34	11,37

Cuadro B-3		Ubicación	Servicentro San Joaquín
Fecha	20/03/2012	Línea / figura	Línea blanca
Estadística	R _L (15 m)	R _L (30 m)	Q _D
Máximo	456	332	128
Mínimo	128	110	55
Media	310,6	249	94,86
Desv. Estándar	97,140	63,25	14,97

Cuadro B-4		Ubicación	Servicentro San Joaquín
Fecha	20/03/2012	Línea / figura	Flechas y 60 kph
Estadística	R _L (15 m)	R _L (30 m)	Q _D
Máximo	562	397	105
Mínimo	230	133	9
Media	420,8	296,83	56,33
Desv. Estándar	100,48	58,04	30,07

RETROREFLECTÓMETRO MANUAL EASYLUX
(en unidades mcd/m²/lx)

Cuadro B-5		Ubicación	Oeste de Walmart
Fecha	20/03/2012	Línea / figura	Continuas amarilla (Alaj - Her)
Estadística	R _L (15 m)	R _L (30 m)	Q _D
Máximo	362	244	155
Mínimo	73	166	100
Media	311,64	205,92	127,72
Desv. Estándar	55,17	20,67	12,23

Cuadro B-6		Ubicación	Oeste de Walmart
Fecha	20/03/2012	Línea / figura	Continuas amarillas (Her - Alaj)
Estadística	R _L (15 m)	R _L (30 m)	Q _D
Máximo	375	254	192
Mínimo	30	148	107
Media	305,71	204,43	135,06
Desv. Estándar	57,67	25,93	13,45

Cuadro B-7		Ubicación	Oeste de Walmart
Fecha	20/03/2012	Línea / figura	Línea blanca
Estadística	R _L (15 m)	R _L (30 m)	Q _D
Máximo	579	446	121
Mínimo	378	235	66
Media	524,06	369,36	93,63
Desv. Estándar	44,59	46,79	16,01

Cuadro B-8		Ubicación	Oeste de Walmart
Fecha	20/03/2012	Línea / figura	Flechas y 60 kph
Estadística	R _L (15 m)	R _L (30 m)	Q _D
Máximo	697	451	126
Mínimo	120	254	10
Media	491,90	363,68	91,06
Desv. Estándar	107,17	49,68	38,44

RETROREFLECTÓMETRO MANUAL EASYLUX
(en unidades mcd/m²/lx)

Cuadro B-9		Ubicación	Servicentro San Joaquín
Fecha	12/04/2012	Línea / figura	Continuas amarilla (Alaj - Her)
Estadística	R _L (15 m)	R _L (30 m)	Q _D
Máximo	287	225	91
Mínimo	189	113	60
Media	244,34	188,40	79,53
Desv. Estándar	26,15	26,83	8,08

Cuadro B-10		Ubicación	Servicentro San Joaquín
Fecha	12/04/2012	Línea / figura	Continuas amarillo (Her - Alaj)
Estadística	R _L (15 m)	R _L (30 m)	Q _D
Máximo	287	216	318
Mínimo	195	146	72
Media	245,52	178,04	99,26
Desv. Estándar	23,87	21,10	48,19

Cuadro B-11		Ubicación	Servicentro San Joaquín
Fecha	12/04/2012	Línea / figura	Línea blanca
Estadística	R _L (15 m)	R _L (30 m)	Q _D
Máximo	448	377	115
Mínimo	153	138	47
Media	316,93	244,15	91,51
Desv. Estándar	84,38	52,87	13,46

Cuadro B-12		Ubicación	Servicentro San Joaquín
Fecha	12/04/2012	Línea / figura	Flechas y 60 kph
Estadística	R _L (15 m)	R _L (30 m)	Q _D
Máximo	566	421	114
Mínimo	140	187	46
Media	437,50	317,50	69,96
Desv. Estándar	73,49	49,01	11,08

RETROREFLECTÓMETRO MANUAL EASYLUX
(en unidades mcd/m²/lx)

Cuadro B-13		Ubicación	Servicentro San Joaquín
Fecha	18/05/2012	Línea / figura	Continuas amarillas (Alaj - Her)
Estadística	R _L (15 m)	R _L (30 m)	Q _D
Máximo	265	182	122
Mínimo	64	105	56
Media	181,85	146,85	73,75
Desv. Estándar	43,10	19,73	11,031

Cuadro B-14		Ubicación	Servicentro San Joaquín
Fecha	18/05/2012	Línea / figura	Continuas amarillas (Her - Alaj)
Estadística	R _L (15 m)	R _L (30 m)	Q _D
Máximo	272	212	84
Mínimo	0	66	51
Media	172,90	137,16	71,67
Desv. Estándar	50,98	29,95	7,21

Cuadro B-15		Ubicación	Servicentro San Joaquín
Fecha	18/05/2012	Línea / figura	Línea blanca
Estadística	R _L (15 m)	R _L (30 m)	Q _D
Máximo	499	364	111
Mínimo	320	260	74
Media	413,45	303,95	91,20
Desv. Estándar	46,05	25,47	9,21

Cuadro B-16		Ubicación	Servicentro San Joaquín
Fecha	18/05/2012	Línea / figura	Flechas y 60 kph
Estadística	R _L (15 m)	R _L (30 m)	Q _D
Máximo	598	389	86
Mínimo	223	155	9
Media	416,01	299,36	59,33
Desv. Estándar	66,96	45,46	14,37

RETROREFLECTÓMETRO MANUAL EASYLUX
(en unidades mcd/m²/lx)

Cuadro B-17		Ubicación	Oeste del Walmart
Fecha	18/05/2012	Línea / figura	Continuas amarillas (Her - Alaj)
Estadística	R _L (15 m)	R _L (30 m)	Q _D
Máximo	267	189	92
Mínimo	138	131	54
Media	229,03	159,03	75,33
Desv. Estándar	28,69	13,62	10,37

Cuadro B-18		Ubicación	Oeste del Walmart
Fecha	18/05/2012	Línea / figura	Continuas amarillas (Alaj - Her)
Estadística	R _L (15 m)	R _L (30 m)	Q _D
Máximo	313	223	94
Mínimo	194	135	57
Media	254,64	176,64	74,00
Desv. Estándar	31,76	24,47	10,92

Cuadro B-19		Ubicación	Oeste del Walmart
Fecha	18/05/2012	Línea / figura	Línea blanca
Estadística	R _L (15 m)	R _L (30 m)	Q _D
Máximo	625	439	107
Mínimo	456	322	70
Media	543,4	375,44	88,88
Desv. Estándar	43,05	34,923	8,87

Cuadro B-20		Ubicación	Oeste del Walmart
Fecha	18/05/2012	Línea / figura	60 kph y otras marcas
Estadística	R _L (15 m)	R _L (30 m)	Q _D
Máximo	572	415	97
Mínimo	125	275	17
Media	473,48	365,04	58,90
Desv. Estándar	92,89	33,25	13,08

RETROREFLECTÓMETRO MANUAL EASYLUX
(en unidades mcd/m²/lx)

Cuadro B-21		Ubicación	Servicentro San Joaquín
Fecha	13/12/2012	Línea / figura	Continuas amarillas (Her - Alaj)
Estadística	R _L (15 m)	R _L (30 m)	Q _D
Máximo	261	191	85
Mínimo	100	64	52
Media	172,56	121,12	73,18
Desv. Estándar	50,23	39,38	8,11

Cuadro B-22		Ubicación	Servicentro San Joaquín
Fecha	13/12/2012	Línea / figura	Continuas amarillas (Alaj - Her)
Estadística	R _L (15 m)	R _L (30 m)	Q _D
Máximo	227	167	94
Mínimo	97	59	63
Media	153,31	108,53	79,53
Desv. Estándar	38,68	30,43	6,52

Cuadro B-23		Ubicación	Servicentro San Joaquín
Fecha	13/12/2012	Línea / figura	Discontinuas (BLANCO)
Estadística	R _L (15 m)	R _L (30 m)	Q _D
Máximo	338	275	104
Mínimo	58	172	60
Media	275,72	213,48	87,24
Desv. Estándar	51,07	24,16	10,26

Cuadro B-24		Ubicación	Servicentro San Joaquín
Fecha	13/12/2012	Línea / figura	Otras Marcas (BLANCO)
Estadística	R _L (15 m)	R _L (30 m)	Q _D
Máximo	531	292	103
Mínimo	140	92	19
Media	258,08	190,37	73,28
Desv. Estándar	73,16	40,63	22,82

RETROREFLECTÓMETRO MANUAL EASYLUX
(en unidades mcd/m²/lx)

Cuadro B-25		Ubicación	Oeste del Walmart
Fecha	13/12/2012	Línea / figura	Continuas amarillas (Her - Alaj)
Estadística	R _L (15 m)	R _L (30 m)	Q _D
Máximo	430	191	206
Mínimo	119	71	24
Media	177,19	112,80	80,02
Desv. Estándar	52,34	28,56	23,56

Cuadro B-26		Ubicación	Oeste del Walmart
Fecha		Línea / figura	Continuas amarillas (Alaj - Her)
Estadística	R _L (15 m)	R _L (30 m)	Q _D
Máximo	307	224	97
Mínimo	75	46	61
Media	164,67	105,89	78,56
Desv. Estándar	81,81	58,17	6,86

Cuadro B-27		Ubicación	Oeste del Walmart
Fecha	13/12/2012	Línea / figura	Discontinuas (BLANCO)
Estadística	R _L (15 m)	R _L (30 m)	Q _D
Máximo	465	339	106
Mínimo	318	218	75
Media	408,56	292,23	87,36
Desv. Estándar	30,10	27,13	8,07

Cuadro B-28		Ubicación	Oeste del Walmart
Fecha	13/12/2012	Línea / figura	Otras Marcas (BLANCO)
Estadística	R _L (15 m)	R _L (30 m)	Q _D
Máximo	488	376	127
Mínimo	82	102	54
Media	270,38	209,20	82,51
Desv. Estándar	93,67	66,40	15,74

ANEXO C: DATOS DE RETRORREFLEXIÓN RUTA 110

RETRORREFLECTÓMETRO MANUAL EASYLUX (en unidades mcd/m²/lx)

Cuadro C-1		Ubicación	Puente María Aguilar
Fecha	15/03/2012	Línea / figura	Continuas amarillo
Estadística	R _L (15 m)	R _L (30 m)	Q _D
Máximo	387	228	97
Mínimo	182	101	65
Media	270,86	162,4	77,3
Desv. Estándar	55,76	37,32	7,23

Cuadro C-2		Ubicación	Puente María Aguilar
Fecha	15/03/2012	Línea / figura	Flechas
Estadística	R _L (15 m)	R _L (30 m)	Q _D
Máximo	940	363	135
Mínimo	406	251	75
Media	539	288,42	100,94
Desv. Estándar	118,53	33,29	14,99

Cuadro C-3		Ubicación	Puente María Aguilar
Fecha	15/03/2012	Línea / figura	Línea Blanca
Estadística	R _L (15 m)	R _L (30 m)	Q _D
Máximo	699	411	143
Mínimo	375	210	92
Media	531,68	316,42	110,89
Desv. Estándar	95,60	55,16	13,55

Cuadro C-4		Ubicación	Barrio Cuba
Fecha	15/03/2012	Línea / figura	Continuas amarillo
Estadística	R _L (15 m)	R _L (30 m)	Q _D
Máximo	466	274	108
Mínimo	211	119	72
Media	306,96	180,56	85,63
Desv. Estándar	63,37	40,61	8,01

RETROREFLECTÓMETRO MANUAL EASYLUX
(en unidades mcd/m²/lx)

Cuadro C-5		Ubicación	Barrio Cuba
Fecha	15/03/2012	Línea / figura	Paso peatonal y 40 kph
Estadística	R _L (15 m)	R _L (30 m)	Q _D
Máximo	831	493	139
Mínimo	176	102	25
Media	535,03	295,06	91,32
Desv. Estándar	178,42	93,43	32,61

Cuadro C-6		Ubicación	Barrio Cuba
Fecha	15/03/2012	Línea / figura	Línea blanca
Estadística	R _L (15 m)	R _L (30 m)	Q _D
Máximo	584	361	136
Mínimo	310	191	64
Media	424,33	251,6	99,93
Desv. Estándar	61,09	35,99	21,76

Cuadro C-7		Ubicación	Clínica Solón Núñez
Fecha	15/03/2012	Línea / figura	Continuas amarillo
Estadística	R _L (15 m)	R _L (30 m)	Q _D
Máximo	315	156	112
Mínimo	167	103	63
Media	215,97	126,18	86,28
Desv. Estándar	27,90	14,01	7,52

Cuadro C-8		Ubicación	Clínica Solón Núñez
Fecha	15/03/2012	Línea / figura	Flechas y zona peatonal
Estadística	R _L (15 m)	R _L (30 m)	Q _D
Máximo	1130	474	148
Mínimo	468	253	100
Media	710,72	367,75	128
Desv. Estándar	146,34	68,02	14,64

RETROREFLECTÓMETRO MANUAL EASYLUX
(en unidades mcd/m²/lx)

Cuadro C-9		Ubicación	Clínica Solón Núñez
Fecha	15/03/2012	Línea / figura	Línea blanca
Estadística	R _L (15 m)	R _L (30 m)	Q _D
Máximo	804	449	147
Mínimo	409	205	100
Media	569,86	322,93	128,7241379
Desv. Estándar	88,34	51,01	11,3574914

Cuadro C-10		Ubicación	Puente María Aguilar
Fecha	12/04/2012	Línea / figura	Continuas amarillo (hacia semáforo)
Estadística	R _L (15 m)	R _L (30 m)	Q _D
Máximo	308	208	57
Mínimo	161	105	38
Media	226,20	147,86	47,58
Desv. Estándar	44,66	30,90	4,13

Cuadro C-11		Ubicación	Puente María Aguilar
Fecha	12/04/2012	Línea / figura	Continuas amarillo (hacia río)
Estadística	R _L (15 m)	R _L (30 m)	Q _D
Máximo	229	154	61
Mínimo	109	68	42
Media	166,25	107,70	50,45
Desv. Estándar	32,96	20,71	4,62

Cuadro C-12		Ubicación	Puente María Aguilar
Fecha	12/04/2012	Línea / figura	Línea blanca
Estadística	R _L (15 m)	R _L (30 m)	Q _D
Máximo	493	315	83
Mínimo	263	161	47
Media	372,14	234,47	61,90
Desv. Estándar	66,58	43,29	8,65

RETROREFLECTÓMETRO MANUAL EASYLUX
(en unidades mcd/m²/lx)

Cuadro C-13		Ubicación	Puente María Aguilar
Fecha	12/04/2012	Línea / figura	Flechas
Estadística	R _L (15 m)	R _L (30 m)	Q _D
Máximo	355	216	63
Mínimo	259	146	40
Media	302,9	181,7	51,53
Desv. Estándar	23,92	16,96	5,82

Cuadro C-14		Ubicación	Barrio Cuba
Fecha	12/04/2012	Línea / figura	Continuas amarillo (Hacia línea de tren)
Estadística	R _L (15 m)	R _L (30 m)	Q _D
Máximo	332	215	64
Mínimo	149	87	37
Media	235	147,54	47,79
Desv. Estándar	51,99	35,47	7,58

Cuadro C-15		Ubicación	Barrio Cuba
Fecha	12/04/2012	Línea / figura	Continuas amarillo (hacia Alajuelita)
Estadística	R _L (15 m)	R _L (30 m)	Q _D
Máximo	289	181	64
Mínimo	159	102	29
Media	204,69	134,04	51,04
Desv. Estándar	32,64	23,33	8,25

Cuadro C-16		Ubicación	Barrio Cuba
Fecha	12/04/2012	Línea / figura	Línea blanca
Estadística	R _L (15 m)	R _L (30 m)	Q _D
Máximo	340	231	90
Mínimo	211	127	45
Media	292,89	182,02	65,10
Desv. Estándar	32,92	23,82	8,93

RETROREFLECTÓMETRO MANUAL EASYLUX
(en unidades mcd/m²/lx)

Cuadro C-17		Ubicación	Barrio Cuba
Fecha	12/04/2012	Línea / figura	Paso peatonal y 40 kph
Estadística	R _L (15 m)	R _L (30 m)	Q _D
Máximo	517	335	79
Mínimo	131	102	39
Media	344,96	208,24	57,06
Desv. Estándar	77,87	46,32	8,11

Cuadro C-18		Ubicación	Clínica Solón Núñez
Fecha	12/04/2012	Línea / figura	Continuas amarillo (desde clínica)
Estadística	R _L (15 m)	R _L (30 m)	Q _D
Máximo	231	132	75
Mínimo	127	82	45
Media	169,33	104,90	66,19
Desv. Estándar	25,63	15,05	6,83

Cuadro C-19		Ubicación	Clínica Solón Núñez
Fecha	12/04/2012	Línea / figura	Continuas amarillo (hacia clínica)
Estadística	R _L (15 m)	R _L (30 m)	Q _D
Máximo	289	154	80
Mínimo	136	88	55
Media	173,71	112,95	62,85
Desv. Estándar	34,35	16,64	7,39

Cuadro C-20		Ubicación	Clínica Solón Núñez
Fecha	12/04/2012	Línea / figura	Línea blanca
Estadística	R _L (15 m)	R _L (30 m)	Q _D
Máximo	507	316	104
Mínimo	250	142	56
Media	341,81	202,04	78,68
Desv. Estándar	59,24	39,66	9,86

RETROREFLECTÓMETRO MANUAL EASYLUX
(en unidades mcd/m²/lx)

Cuadro C-21		Ubicación	Clínica Solón Núñez
Fecha	12/04/2012	Línea / figura	Flechas y zona peatonal
Estadística	R _L (15 m)	R _L (30 m)	Q _D
Máximo	610	342	99
Mínimo	334	182	54
Media	444,24	243,6	74,93
Desv. Estándar	64,21	38,27	9,92

Cuadro C-22		Ubicación	Puente María Aguilar
Fecha	18/05/2012	Línea / figura	Continuas amarillo (hacia semáforo)
Estadística	R _L (15 m)	R _L (30 m)	Q _D
Máximo	300	197	52
Mínimo	195	117	39
Media	235,1	148,23	46,13
Desv. Estándar	30,67	20,28	3,66

Cuadro C-23		Ubicación	Puente María Aguilar
Fecha	18/05/2012	Línea / figura	Continuas amarillo (hacia río)
Estadística	R _L (15 m)	R _L (30 m)	Q _D
Máximo	231	140	58
Mínimo	152	88	47
Media	184,6	114,46	51,63
Desv. Estándar	23,97	15,31	2,94

Cuadro C-24		Ubicación	Puente María Aguilar
Fecha	18/05/2012	Línea / figura	Línea blanca
Estadística	R _L (15 m)	R _L (30 m)	Q _D
Máximo	469	303	67
Mínimo	258	143	47
Media	357,51	219,19	57,67
Desv. Estándar	60,23	41,21	5,44

RETROREFLECTÓMETRO MANUAL EASYLUX
(en unidades mcd/m²/lx)

Cuadro C-25		Ubicación	Puente María Aguilar
Fecha	18/05/2012	Línea / figura	Flechas
Estadística	R _L (15 m)	R _L (30 m)	Q _D
Máximo	350	213	61
Mínimo	240	123	42
Media	300,42	174,33	49,09
Desv. Estándar	33,31	28,12	4,62

Cuadro C-26		Ubicación	Barrio Cuba
Fecha	18/05/2012	Línea / figura	Continuas amarillo (hacia línea de tren)
Estadística	R _L (15 m)	R _L (30 m)	Q _D
Máximo	336	207	58
Mínimo	178	105	36
Media	249,18	153,77	47,5
Desv. Estándar	49,01	33,72	6,34

Cuadro C-27		Ubicación	Barrio Cuba
Fecha	18/05/2012	Línea / figura	Continuas amarillas (hacia Alajuelita)
Estadística	R _L (15 m)	R _L (30 m)	Q _D
Máximo	315	190	64
Mínimo	194	115	34
Media	228,21	143,30	50,08
Desv. Estándar	30,20	22,89	7,56

Cuadro C-28		Ubicación	Barrio Cuba
Fecha	18/05/2012	Línea / figura	Línea blanca
Estadística	R _L (15 m)	R _L (30 m)	Q _D
Máximo	383	226	74
Mínimo	277	166	50
Media	326,25	196,55	61,29
Desv. Estándar	28,35	17,71	5,58

RETROREFLECTÓMETRO MANUAL EASYLUX
(en unidades mcd/m²/lx)

Cuadro C-29		Ubicación	Barrio Cuba
Fecha	18/05/2012	Línea / figura	Paso peatonal y 40 kph
Estadística	R _L (15 m)	R _L (30 m)	Q _D
Máximo	472	272	70
Mínimo	231	123	29
Media	378,64	218,93	56,45
Desv. Estándar	63,06	37,47	10,67

Cuadro C-30		Ubicación	Clínica Solón Núñez
Fecha	18/05/2012	Línea / figura	Continuas amarillas (desde Clínica)
Estadística	R _L (15 m)	R _L (30 m)	Q _D
Máximo	247	135	71
Mínimo	150	82	43
Media	186,70	110,88	61,81
Desv. Estándar	19,98	12,67	6,08

Cuadro C-31		Ubicación	Clínica Solón Núñez
Fecha	18/05/2012	Línea / figura	Continuas amarillas (hacia Clínica)
Estadística	R _L (15 m)	R _L (30 m)	Q _D
Máximo	277	161	77
Mínimo	146	79	44
Media	195,96	119,28	59,09
Desv. Estándar	29,26	20,00	7,54

Cuadro C-32		Ubicación	Clínica Solón Núñez
Fecha	18/05/2012	Línea / figura	Línea blanca
Estadística	R _L (15 m)	R _L (30 m)	Q _D
Máximo	484	272	104
Mínimo	229	116	46
Media	360,95	194,58	77,75
Desv. Estándar	58,50	33,84	13,43

RETROREFLECTÓMETRO MANUAL EASYLUX
(en unidades mcd/m²/lx)

Cuadro C-33		Ubicación	Clínica Solón Núñez
Fecha	18/05/2012	Línea / figura	Flechas y zona peatonal
Estadística	R _L (15 m)	R _L (30 m)	Q _D
Máximo	468	245	85
Mínimo	286	148	50
Media	388,31	195,27	67,95
Desv. Estándar	38,98	21,90	8,52

Cuadro C-34		Ubicación	Clínica Solón Núñez
Fecha	13/12/2012	Línea / figura	Desde clínica
Estadística	R _L (15 m)	R _L (30 m)	Q _D
Máximo	138	82	62
Mínimo	44	22	40
Media	101,66	57,02	46,86
Desv. Estándar	27,07	17,29	4,58

Cuadro C-35		Ubicación	Clínica Solón Núñez
Fecha	13/12/2012	Línea / figura	Hacia clínica
Estadística	R _L (15 m)	R _L (30 m)	Q _D
Máximo	178	112	58
Mínimo	51	33	0
Media	128,63	74,68	43,65
Desv. Estándar	36,69	21,84	8,31

Cuadro C-36		Ubicación	Clínica Solón Núñez
Fecha	13/12/2012	Línea / figura	Línea blanca
Estadística	R _L (15 m)	R _L (30 m)	Q _D
Máximo	185	104	80
Mínimo	107	51	37
Media	157,07	80,07	62,29
Desv. Estándar	18,88	12,56	10,87

RETROREFLECTÓMETRO MANUAL EASYLUX
(en unidades mcd/m²/lx)

Cuadro C-37		Ubicación	Clínica Solón Núñez
Fecha	13/12/2012	Línea / figura	Flechas y zona peatonal
Estadística	R _L (15 m)	R _L (30 m)	Q _D
Máximo	329	213	87
Mínimo	91	46	47
Media	168,8	94,23	61,73
Desv. Estándar	47,44	34,21	10,88

Cuadro C-38		Ubicación	Puente río María Aguilar
Fecha	13/12/2012	Línea / figura	Hacia río
Estadística	R _L (15 m)	R _L (30 m)	Q _D
Máximo	142	86	52
Mínimo	72	41	34
Media	104,19	60,47	42,69
Desv. Estándar	21,84	12,78	4,27

Cuadro C-39		Ubicación	Puente río María Aguilar
Fecha	13/12/2012	Línea / figura	Hacia semáforo
Estadística	R _L (15 m)	R _L (30 m)	Q _D
Máximo	190	120	46
Mínimo	93	50	28
Media	136,92	80,23	38,25
Desv. Estándar	30,81	19,82	3,64

Cuadro C-40		Ubicación	Puente río María Aguilar
Fecha	13/12/2012	Línea / figura	Línea blanca
Estadística	R _L (15 m)	R _L (30 m)	Q _D
Máximo	259	158	60
Mínimo	122	64	40
Media	201,21	114,21	51,42
Desv. Estándar	34,20	21,84	5,80

RETROREFLECTÓMETRO MANUAL EASYLUX
(en unidades mcd/m²/lx)

Cuadro C-41		Ubicación	Puente río María Aguilar
Fecha	13/12/2012	Línea / figura	Flechas
Estadística	R _L (15 m)	R _L (30 m)	Q _D
Máximo	765	150	56
Mínimo	50	24	32
Media	181,44	91,38	42,26
Desv. Estándar	131,48	40,26	5,44

Cuadro C-42		Ubicación	Barrio Cuba
Fecha	13/12/2012	Línea / figura	Hacia línea de tren
Estadística	R _L (15 m)	R _L (30 m)	Q _D
Máximo	231	146	55
Mínimo	99	59	33
Media	165,37	99,62	42,28
Desv. Estándar	31,74	21,74	5,85

Cuadro C-43		Ubicación	Barrio Cuba
Fecha	13/12/2012	Línea / figura	Hacia Alajuelita
Estadística	R _L (15 m)	R _L (30 m)	Q _D
Máximo	221	140	51
Mínimo	160	91	33
Media	192,96	113,45	43,12
Desv. Estándar	14,76	10,55	4,22

Cuadro C-44		Ubicación	Barrio Cuba
Fecha	13/12/2012	Línea / figura	Línea blanca
Estadística	R _L (15 m)	R _L (30 m)	Q _D
Máximo	218	125	69
Mínimo	59	41	33
Media	159,58	89,41	50,56
Desv. Estándar	39,19	22,74	6,95

Cuadro C-45		Ubicación	Barrio Cuba
Fecha	13/12/2012	Línea / figura	Flechas y zona peatonal
Estadística	R _L (15 m)	R _L (30 m)	Q _D
Máximo	232	141	73
Mínimo	49	25	19
Media	121,05	70,48	49,22
Desv. Estándar	47,50	28,98	13,71

ANEXO D: PRUEBA ESTADÍSTICA t

Una de las pruebas estadísticas más usuales para determinar diferencias significativas entre dos medias o dos promedios x_1 y x_2 es la prueba t Student, muchas veces llamada únicamente prueba t , para dos grupos de datos analizados. La ecuación E-1 es la que se utiliza para calcular la desviación estándar combinada para los dos grupos, y la ecuación E-2 para calcular el valor experimental t , donde n es el tamaño de muestra y s es la desviación estándar, para los grupos de datos 1 y 2.

$$s_{AB} = \sqrt{\frac{(n_1-1) \cdot s_1^2 + (n_2-1) \cdot s_2^2}{(n_1+n_2-2)}} \quad (\text{E-1})$$

$$t = \frac{|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|}{s_{AB} \cdot \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} \quad (\text{E-2})$$

El resultado de esta prueba es aceptar o rechazar la hipótesis nula H_0 . La hipótesis nula establece que las medias entre dos muestras son estadísticamente iguales, o mejor dicho, que no hay suficiente evidencia para afirmar que las muestras son significativamente diferentes, para un nivel de confianza escogido. Para la prueba se escogió un nivel de confianza de 95%, ya que es el que generalmente se utiliza en el área de transportes y seguridad vial. Si la hipótesis nula fuera rechazada, significaría que hay un 95% o más de probabilidades de que hayan diferencias significativas entre las medias o promedios de las muestras.

Una vez calculado el estadístico experimental t , se determina un estadístico t teórico, asociado ya sea a una o dos colas. Al no saber cual media pueda resultar mayor que la otra, se toma el valor de dos colas.

Siguiendo el caso de la sección 9.4, se calcula la desviación estándar combinada y el estadístico t experimental.

$$s_{AB} = \sqrt{\frac{(n_1-1) \cdot s_1^2 + (n_2-1) \cdot s_2^2}{(n_1+n_2-2)}} = \sqrt{\frac{(34-1) \cdot (22,65)^2 + (104-1) \cdot (31,27)^2}{(34+104-2)}} = 29,411 \quad (\text{E-3})$$

$$t = \frac{|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|}{s_{AB} \cdot \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} = \frac{|130,65 - 121,72|}{29,411 \cdot \sqrt{\frac{1}{34} + \frac{1}{104}}} = 1,537 \quad (\text{E-4})$$

Para obtener el estadístico t teórico hay tablas en los libros de estadística. También se encuentran fácilmente calculadores estadísticos en línea, tal como el que se utilizó en este caso:

http://www.tutor-homework.com/statistics_tables/statistics_tables.html

En este calculador se escoge la opción de dos colas, se introduce la probabilidad 0,05 correspondiente al 95% de confianza, y el valor de los grados de libertad, o tamaño de muestra combinada ($n_1 + n_2 - 2 = 34 + 104 - 2 = 136$), para así obtener un estadístico t teórico de 1,978.

Dado que el estadístico experimental $t_{\text{exp}} = 1,537$ es menor que el estadístico teórico $t_t = 1,978$, se acepta la hipótesis nula; es decir, que los valores de retroreflexión promedio no son significativamente diferentes entre sí, con una confianza del 95%.



LanammeUCR

**LABORATORIO NACIONAL
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES**