



UNIVERSIDAD DE COSTA RICA  
LABORATORIO NACIONAL DE MATERIALES Y  
MODELOS ESTRUCTURALES  
UNIDAD DE GESTIÓN DE  
INFRAESTRUCTURA VIAL

**Proyecto No. LM-PI-GM-01-09:**

**PROYECTO DE GESTIÓN Y EVALUACIÓN DE LA RED VIAL CANTONAL  
DE LA MUNICIPALIDAD DE BELÉN  
INFORME DE DIAGNÓSTICO Y PLANES DE INVERSIÓN**

Realizado por:

**Ing. Sharline López Ramírez**  
**Ing. Jaime Allen Monge, M.Sc.**

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) 2511-4971

Fax: (506) 2511-4442

E-mail: [slopez@lanamme.ucr.ac.cr](mailto:slopez@lanamme.ucr.ac.cr)  
[jallen@lanamme.ucr.ac.cr](mailto:jallen@lanamme.ucr.ac.cr)

San José, Costa Rica  
JUNIO 2009

## **Proceso de Gestión de Infraestructura Vial**

### **Importancia**

El transporte por carreteras es el principal medio de movilización con el que cuenta nuestro país, tanto para personas como para bienes. La red vial cantonal (RVC) es un elemento fundamental para el desarrollo, ya que al estar conectada a la red vial nacional proporciona un mayor dinamismo en la economía nacional y local, esto al mejorar las condiciones para que se de el intercambio de bienes y servicios.

La infraestructura vial está conformada por todos aquellos elementos que facilitan el desplazamiento de los vehículos de un punto a otro de una manera segura y confortable. Entre los elementos que la conforman se encuentran los pavimentos, puentes, la señalización vertical y horizontal, taludes, terraplenes, túneles, dispositivos de seguridad tales como barreras de contención, drenajes, espaldón, entre otros.

Un sistema de administración de infraestructura vial contempla la administración adecuada de los recursos económicos y humanos disponibles, de manera que estos sean optimizados para conservar y rehabilitar cada uno de sus componentes, procurando que funcionen como un conjunto armónico en función del usuario, lo cual propicia el desarrollo económico y social de la región en la que se encuentra.

La conservación de las vías se enfoca en dos objetivos fundamentales. El primero de ellos se relaciona con el servicio que se le brinda a los usuarios de la red, brindando una circulación confortable, segura y fluida, disminuyendo con esto los costos de transporte, así como los tiempos de viaje. Por otro lado la conservación del patrimonio vial que forma parte de los activos del estado.

La importancia del tema se enfoca en maximizar los beneficios obtenidos al invertir en la red cantonal de la Municipalidad de Belén, proporcionando políticas de inversión para la rehabilitación y el mantenimiento de sus rutas basándose en fundamentos técnicos, de manera que se de una recuperación sostenible a mediano plazo.

Es labor de las municipalidades velar por el buen estado de su red cantonal. El municipio financia las obras de rehabilitación y mantenimiento de la red a través del Fondo Vial, el que está establecido en la Ley de Simplificación y Eficiencias Tributarias (Ley N° 8114).

### **Sistema de administración de pavimentos (SAP)**

Parte fundamental de un sistema de administración de infraestructura son los pavimentos, pues es sobre su capa de rodadura donde diversos medios de transporte se desplazan. A los pavimentos se les asocia la mayor parte de los costos de usuario y es uno de los elementos de la infraestructura que más recursos económicos y financieros requieren para su construcción, así como para su mantenimiento o rehabilitación.

Cabe destacar que a través de la aplicación del SAP se disminuye la incertidumbre de la inversión, ya que las decisiones se basan en estudios técnicos que permiten guiar de una mejor manera las inversiones, con el fin de dar un mejor aprovechamiento y rentabilidad de los recursos disponibles.

Un sistema de gestión de pavimentos presenta una estructura general que se compone por cinco etapas bien definidas: planificación, diseño, construcción, mantenimiento y evaluación, las cuales son descritas en la Figura 1.

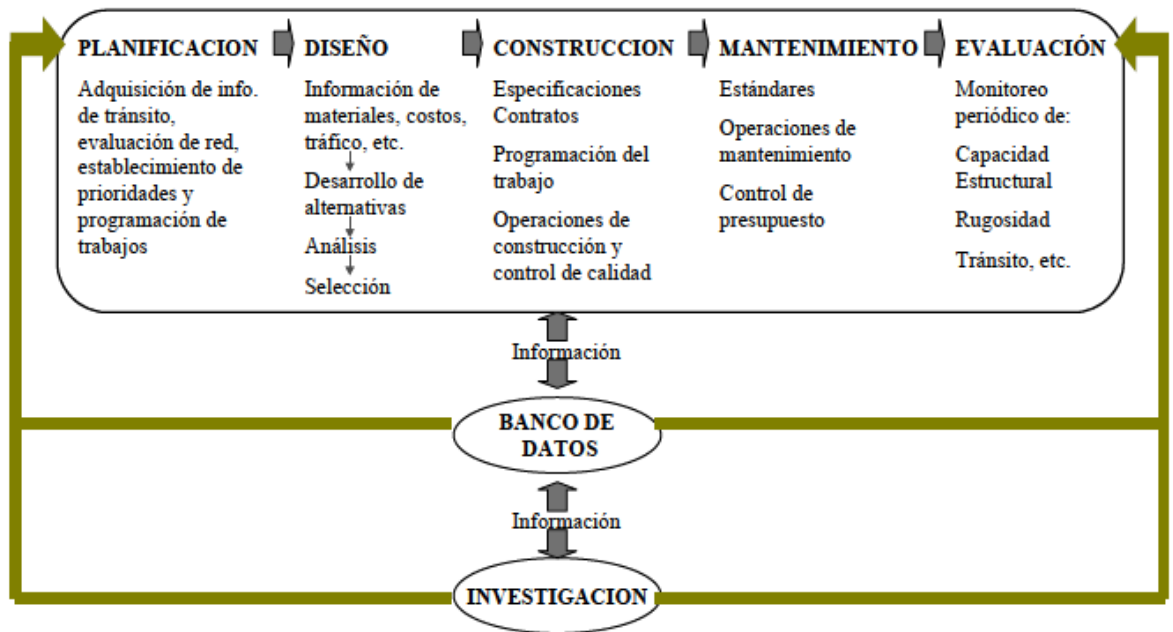


Figura 1: Estructura general de un sistema de gestión de pavimentos (Fuente: Haas, 1993).

La gestión de pavimentos debe ser capaz de ser usada por el organismo a cargo de la conservación de caminos y contribuir a la toma de decisiones respecto de los proyectos individuales.

Por otra parte, la utilización de un adecuado sistema de gestión sobre los caminos permitirá obtener el óptimo rendimiento de los recursos invertidos, valorando para tal efecto a los diversos costos involucrados. Para aplicar de manera eficaz un sistema de gestión es necesario que este cuente con ciertos requerimientos esenciales:

- Capacidad de ser fácilmente utilizado, posibilitando agregar y actualizar datos y modificarlo con nueva información de manera sencilla.
- Capacidad de considerar estrategias alternativas dentro de la evaluación.
- Capacidad de identificar la estrategia o alternativa óptima.
- Capacidad de basar sus decisiones en procedimientos racionales, con atributos, criterios y restricciones cuantificables.
- Capacidad de utilizar la información para la retroalimentación del sistema y llevar un control del cambio en las condiciones de la red.

Los pavimentos son estructuras complejas que se ven afectadas por diferentes variables: combinaciones de cargas que soportan, solicitudes de medio ambiente, materiales y formas de construcción, mantención, etc. Es importante entender claramente los factores técnicos y económicos que involucran su construcción, explotación y mantención con el fin de poder hacer una apropiada gestión de pavimentos.

El comienzo de una gestión integral de los elementos de la infraestructura vial puede iniciar con un elemento fundamental y de particular importancia, el pavimento, pero en forma progresiva deben aplicarse herramientas que permitan gestionar la

conservación e incorporar los demás elementos (Ej. alcantarillado, puentes, señalización, etc.) que proveen al usuario de una operación segura y de bajo costo (De Solminihaç, 1998).

### Proceso de Gestión de Infraestructura Vial Municipal

Para establecer un sistema de gestión vial es necesario delimitar todas sus fases y destacar de manera adecuada los productos asociados a cada una de ellas, el siguiente esquema demuestra el flujo grama para el proceso de gestión vial en el ámbito municipal, aplicado específicamente a la Municipalidad de Belén.

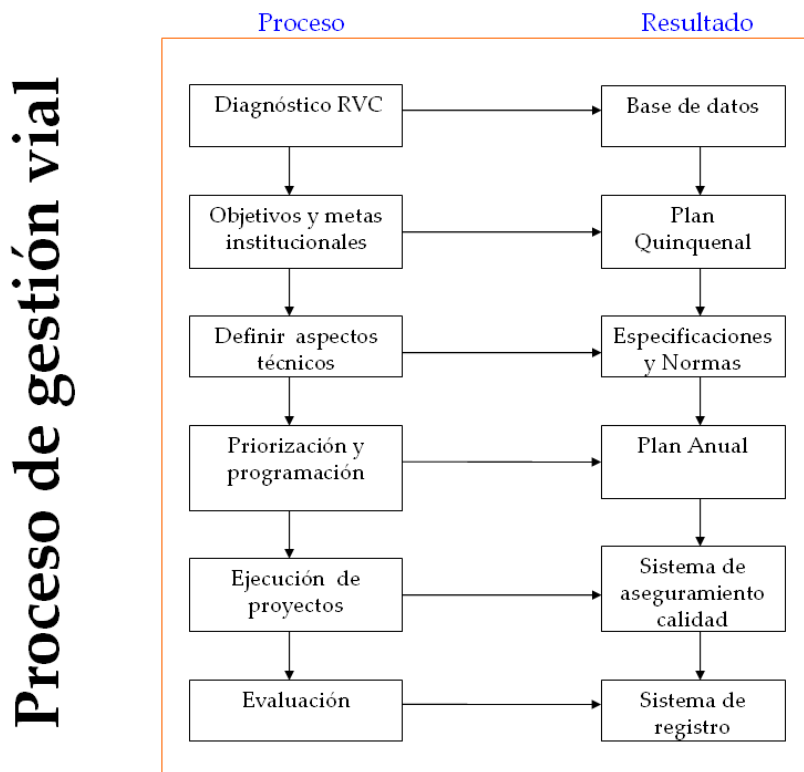


Figura 2. Esquema de proceso de gestión vial (Fuente: LanammeUCR, 2008).

Se elaboró el diagnóstico de la Red Vial Cantonal (RVC), también se obtuvo los costos generales de mantenimiento, conservación y reconstrucción en la Red Vial Cantonal, los cuales deben ser recalculados al realizar el diseño correspondiente a cada intervención al llevarse a nivel de proyecto. El producto principal es la base de datos del diagnóstico y con esto los planes de inversión.

Para el presente estudio se definen varios escenarios presupuestarios con diferentes objetivos y metas institucionales, acorde con las posibilidades de inversión propias de la municipalidad. Con la ayuda de un programa de optimización lineal se definen escenarios de inversión para veinte años en el futuro, con los mismos resultados se obtienen propuestas de posibles planes quinquenales para la conservación de la RVC.

Los sistemas de gestión de infraestructura vial también son conocidos como sistemas de administración de pavimentos, los mismos funcionan con tres distintos niveles dependiendo del detalle:

- Nivel estratégico: planes globales a realizados a largo plazo (20 años). Permiten maximizar los recursos.
- Nivel táctico: planes que priorizan los proyectos por realizar a mediano plazo (4 ó 5 años).
- Nivel operativo: se enfoca en el diseño de los proyectos por ejecutar en el año siguiente.

## Esquema Metodológico

A continuación se presenta el esquema metodológico implementado para determinar el diagnóstico de la RVC de Belén y obtener diferentes planes de inversión, acorde con sus posibilidades financieras.

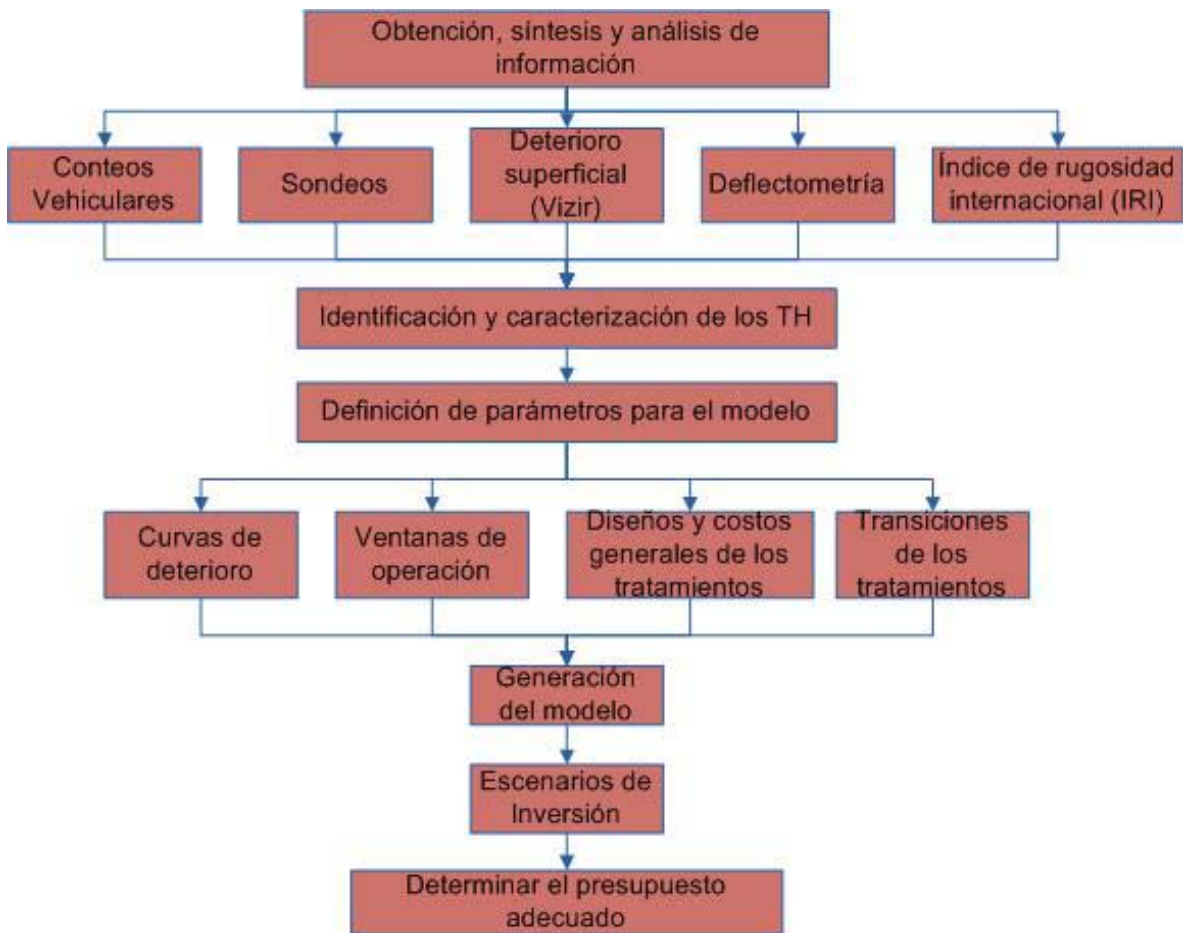


Figura 3. Esquema metodológico (Fuente: López, 2009).

### Síntesis y Análisis de Información

Se detalla la síntesis del análisis de información para los datos de entrada.

#### Clasificación:

La clasificación se determina con la experiencia de la Unidad Técnica de Gestión Vial de la Municipalidad de Belén (UTGVB). También se realiza un recorrido preliminar por la RVC, para determinar puntos estratégicos de mayores volúmenes y observar un panorama general de la movilidad en la RVC. Se adjunta un mapa con la clasificación de la RVC de la Municipalidad de Belén.

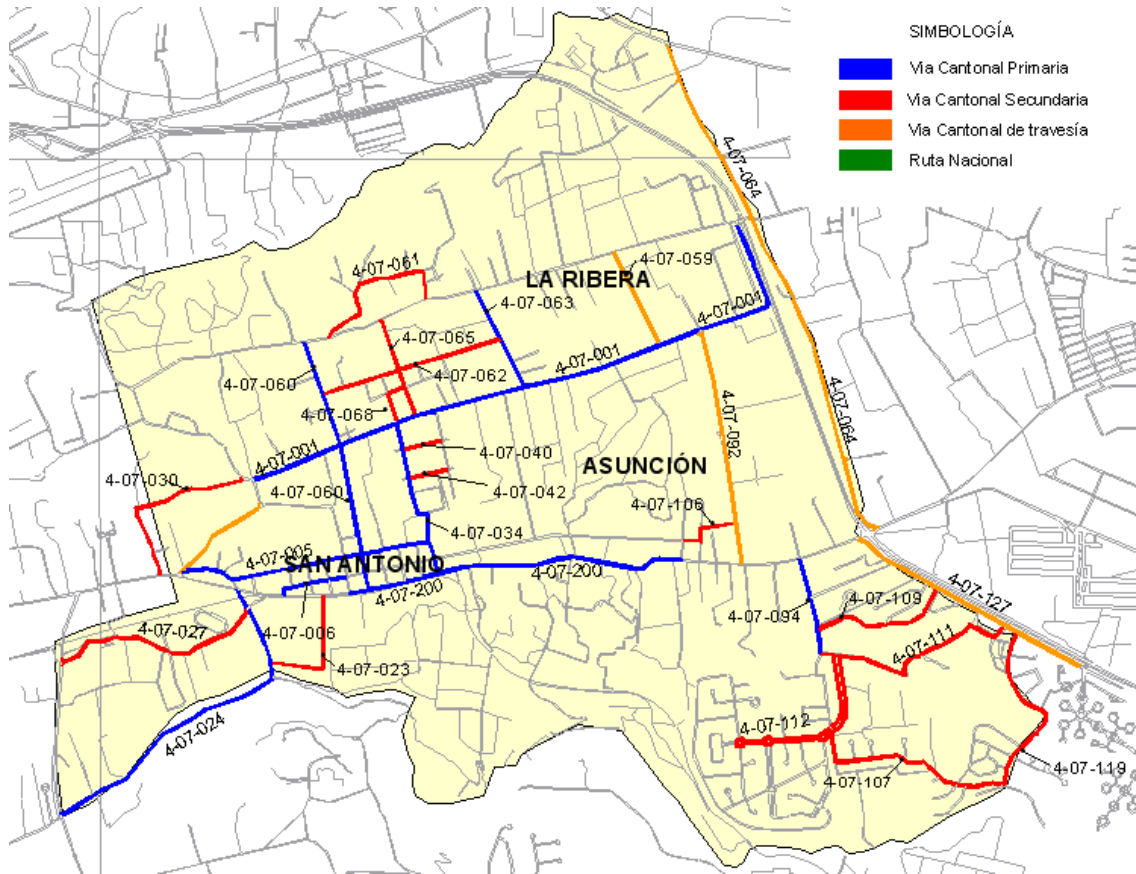


Figura 4. Clasificación de la RVC de Belén (Fuente: LanammeUCR, 2009).

Conteos vehiculares:

Se realizaron conteos diarios y semanales utilizando los contadores automáticos. La estimación del tránsito promedio diario anual (TPDA) se realizó usando la teoría de factores de expansión. En la Figura 4 se muestra la ubicación de los conteos vehiculares.



Figura 5. Ubicación de conteos vehiculares en la RVC de Belén (Fuente: López, 2009).

En la Figura 6 se muestra la el TPDA estimado para la RVC de Belén.

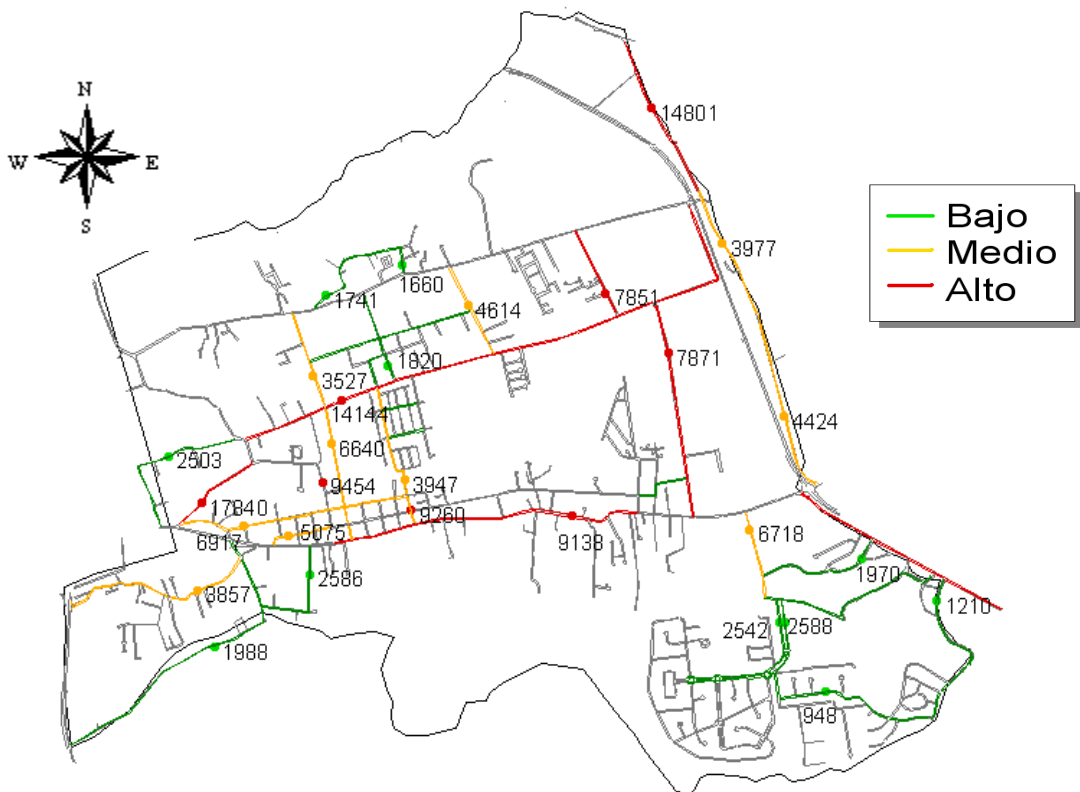


Figura 6. TPDA estimado en la RVC de Belén (Fuente: López, 2009).

### Sondeos (cielos abiertos):

Con los ensayos de cielos abiertos se determinan los espesores de las diferentes capas. Se realiza el ensayo de CBR en sitio, que brinda una magnitud de la capacidad portante de la sub-rasante.

Además se llevan muestras de sub-rasante al laboratorio para realizar pruebas de suelos: límites de plasticidad y porcentaje más fino que 75  $\mu\text{m}$ , Se realizaron 39 sondeos inicialmente sobre la RVC de Belén. En la siguiente figura se muestran los puntos de sondeo.



Figura 7. Ubicación de los sondeos realizados en la RVC de Belén (Fuente: López, 2009).

La información recopilada de algunos de los sondeos viene detallada en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Información de sondeos cielos abiertos (Fuente: López, 2009).

Sondeo	Ubicación	Espesor de las capas (cm)					Espesor del pavimento (cm)	CBR in situ	Límites de Atterberg			% más fino que 75 $\mu\text{m}$
		CA <sub>1</sub>	BE <sub>2</sub>	BG <sub>3</sub>	SB <sub>4</sub>	SR <sub>5</sub>			LL <sub>6</sub>	LP <sub>7</sub>	IP <sub>8</sub>	
5	Cariari	3,5	-	8,5	31,0	-	43,0	14,89	-	-	-	-
7	Cariari	9,0	-	10,0	40,0	11,0	70,0	3,35	-	-	-	-
12	Cariari	9,0	-	16,0	-	6,0	31,0	3,74	73	44	29	67,5
31	Cariari	5,0	-	18,0	-	7,0	30,0	3,83	54	32	22	62,4
32	Cariari	4,0	-	19,0	-	10,0	33,0	8,98	41	26	16	63,7
51	C. Arbolito	4,0	9,0	16,0	-	5,0	34,0	3,42	-	-	-	-



58	C. Arbolito	4,0	35,0	-	-	5,0	44,0	4,83	26	22	5	28,0
60	C. Arbolito	5,0	45,0	-	-	10,0	60,0	5,98	57	42	16	63,8
64	C. Arbolito	11,0	11,5	24,0	11,0	-	57,5	5,80	56,0	37,0	19,0	87,5
66	C. Arbolito	10,0	-	25,0	-	6,0	41,0	13,54	-	-	-	-
53	C. Cementerio	11,0	-	21,0	-	8,0	40,0	7,56	-	-	-	-
57	C. Cementerio	8,0	-	33,0	-	-	41,0	2,45	42	25	17	57,3
A	C. Cementerio	9,0	-	33,0	-	9,0	51,0	4,46	-	-	-	-
15	Morales y Boulevard	13,5	-	16,5	28,0	4,0	62,0	4,75	-	-	-	-
17	Morales y Boulevard	4,0	-	14,0	40,0	8,0	66,0	5,63	40	31	9	35,5
29	Morales y Boulevard	9,5	-	19,5	-	10,0	39,0	8,87	-	-	-	-
34	Doña Claudia	9,0	-	13,0	14,0	8,0	44,0	12,56	-	-	-	-
H	Doña Claudia	10,0	-	12,0	21,0	5,0	48,0	4,23	-	-	-	-
54	Iglesia La Ribera	9,0	-	11,0	-	12,0	32,0	16,68	-	-	-	-
55	Iglesia La Ribera	4,5	-	14,5	-	10,0	29,0	15,05	44,0	30,0	14,0	46,0
56	Fidel Chávez	6,0	-	28,0	-	20,0	54,0	3,09	-	-	-	-
B	Fidel Chávez	8,0	-	30,0	-	11,0	49,0	3,15	61,0	42,0	19,0	58,9

Adicionalmente se realizaron 17 sondeos nuevos, cuando se obtuvieron los tramos homogéneos.

#### Deterioro superficial (VIZIR):

La evaluación de la red por medio esta metodología se realizó durante el mes de abril del año 2008, por parte de estudiantes del curso de Taller de Diseño que se imparte en la Escuela de Ingeniería Civil de la Universidad de Costa Rica.

Se realizó un levantamiento de daños de la vía de un tramo de 50 m representativo de 300 m, se evaluó la red según daños estructurales (Tipo A) y superficiales (Tipo B).

Los daños de cada tramo analizado se determinaron cuantificando la longitud de los ahuellamientos y grietas longitudinales presentes, mientras que el cuero de lagarto, bacheos y parcheos se cuantificaron por medio de unidades de área. A partir de estos resultados se obtuvo el índice de fisuración y de deformación, los cuales generaron el valor del índice de deterioro superficial "Is", en la Figura 7 se observan de manera gráfica los resultados obtenidos.

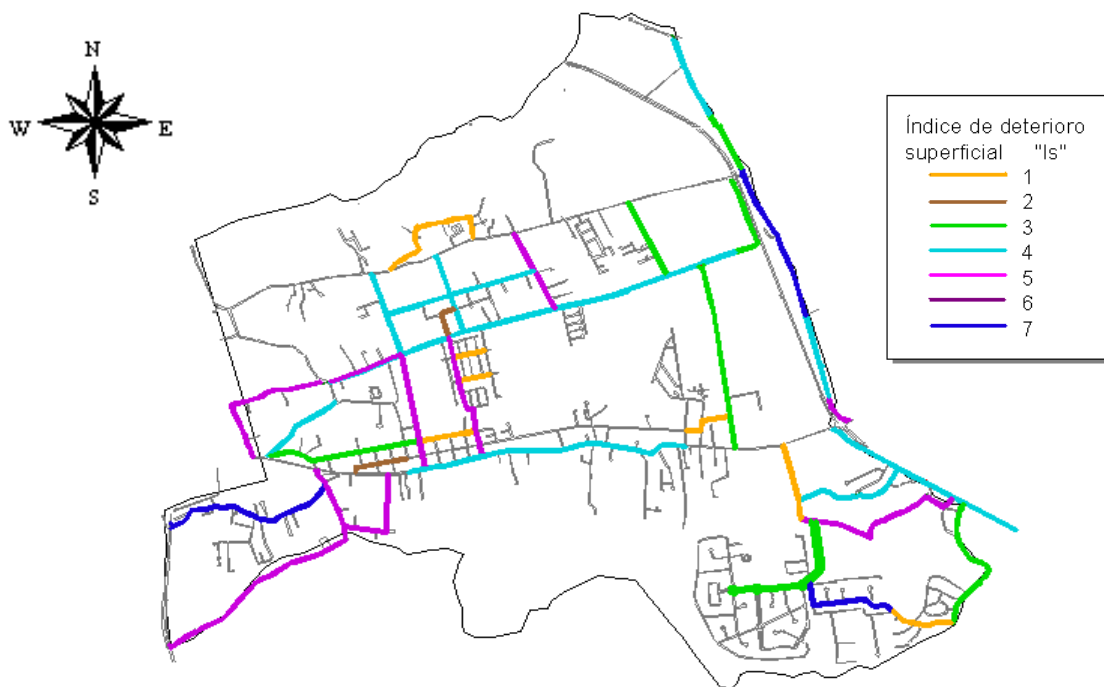


Figura 8. Índice de deterioro de vías principales de la RVC de Belén (Fuente: López, 2009).

Deflectometría (FWD):

En cuanto a la condición estructural de la red se evaluó por medio de la medición de las deflexiones obtenidas a través del ensayo del deflectómetro de impacto. Éste ensayo permite obtener la capacidad estructural actual de los pavimentos.

En las vías primarias y de travesía se realizó la medición cada 25 metros, para las calles secundarias se realizaron cada 50 metros. La densidad de las mediciones se debió a la alta heterogeneidad que se presenta en las redes municipales en cuanto a su estructura y estado debido a las prácticas constructivas utilizadas y a las diversas intervenciones puntuales realizadas durante su vida útil. La evaluación de las deflexiones de la red se realiza en horas de la noche y madrugada con el objetivo de realizar el ensayo a temperaturas cercanas a los 20 °C, pues la variación en la temperatura puede influenciar los resultados considerablemente. Se realiza una clasificación según los rangos establecidos por LanammeUCR, se resume la misma en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Categorías de deflexiones para diferentes TPD (Fuente: LanammeUCR, 2008).

Tipo de Base	Categoría	TPD			
		0-5000	5000-15000	15000-40000	Casos Particulares
Base Granular	Bueno	0 - 76.5	0 - 70.8	0 - 50.2	0 - 48.5
	Regular	76.5 - 88.5	70.8 - 83.3	50.2 - 69.4	48.5 - 57.6
	Malo	88.5 - 115.7	83.3 - 112.9	69.4 - 95.2	57.6 - 80.8
	Severamente Deteriorado	115.7 en adelante	112.9 en adelante	95.2 en adelante	80.8 en adelante
Base Estabilizada	Bueno	0 - 36.4	0 - 32.4	0 - 31.7	0 - 24.5
	Regular	36.4 - 39.7	32.4 - 36.7	31.7 - 35.9	24.5 - 26.9
	Malo	39.7 - 53.3	36.7 - 50.4	35.9 - 50.5	26.9 - 38.0
	Severamente Deteriorado	53.3 en adelante	50.4 en adelante	50.5 en adelante	38.0 en adelante

En la Figura 9 se observan de manera gráfica los resultados obtenidos.



Figura 9. Calificación por deflexiones de la RVC de Belén (Fuente: López, 2009).

#### Índice de Rugosidad Internacional (IRI):

El IRI es utilizado en muchos países como parámetro de aceptación de obras así como para la gestión de pavimentos. Este índice está relacionado con los costos de operación de los vehículos y la vida útil de los pavimentos.

El IRI resume matemáticamente el perfil longitudinal de la superficie de camino en una huella, representando las vibraciones inducidas por la regularidad de un camino en un auto de pasajeros típico, está definido por el valor de referencia de la pendiente promedio rectificadas (RARS80) producto de la simulación del modelo de cuarto de carro, (RQCS), para una velocidad de desplazamiento de 80 km/h. El IRI aumenta conforme la rugosidad aumenta, como se representa en la Figura 10.

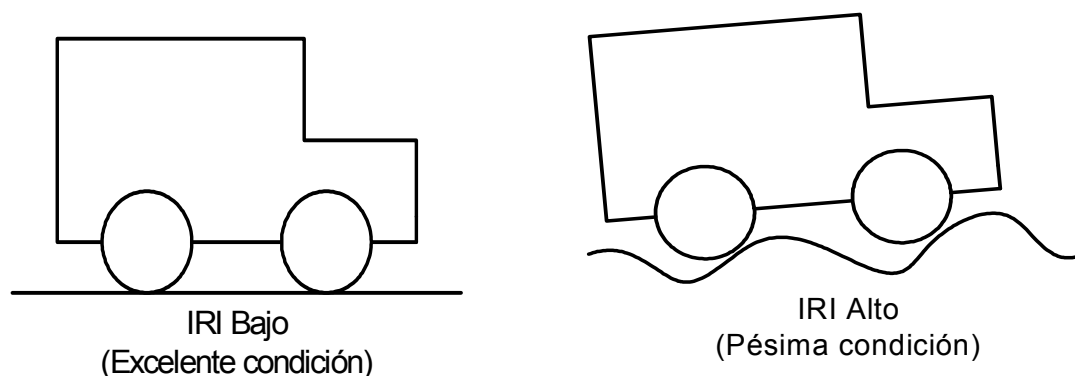


Figura 10. Esquema del Índice de Rugosidad Internacional (Fuente: LanammeUCR, 2008).

El IRI puede ser calculado sobre cualquier longitud de camino. Para ser precisos se debe especificar cada qué longitud se determina dicho valor, ya que el IRI es el valor medio de los IRI unitarios.

El equipo utilizado para la medición del IRI es del tipo perfilómetro inercial. Estos son equipos de alto rendimiento que producen medidas automáticas y de alta calidad del perfil del camino. Las mediciones son independientes de cualquier variación en el peso y velocidad del vehículo, temperatura, color y textura del pavimento. En la Tabla 3 se muestra los rangos de clasificación para el parámetro del IRI.

**Tabla 3.** Categorización del IRI (Fuente: LanammeUCR, 2008).

Valor	Condición
0 - 3	Bueno
3 - 5	Regular
5 - 10	Malo
10 o más	Muy deteriorado

En la Figura 11 se muestra la clasificación de la RVC de Belén con respecto al IRI.

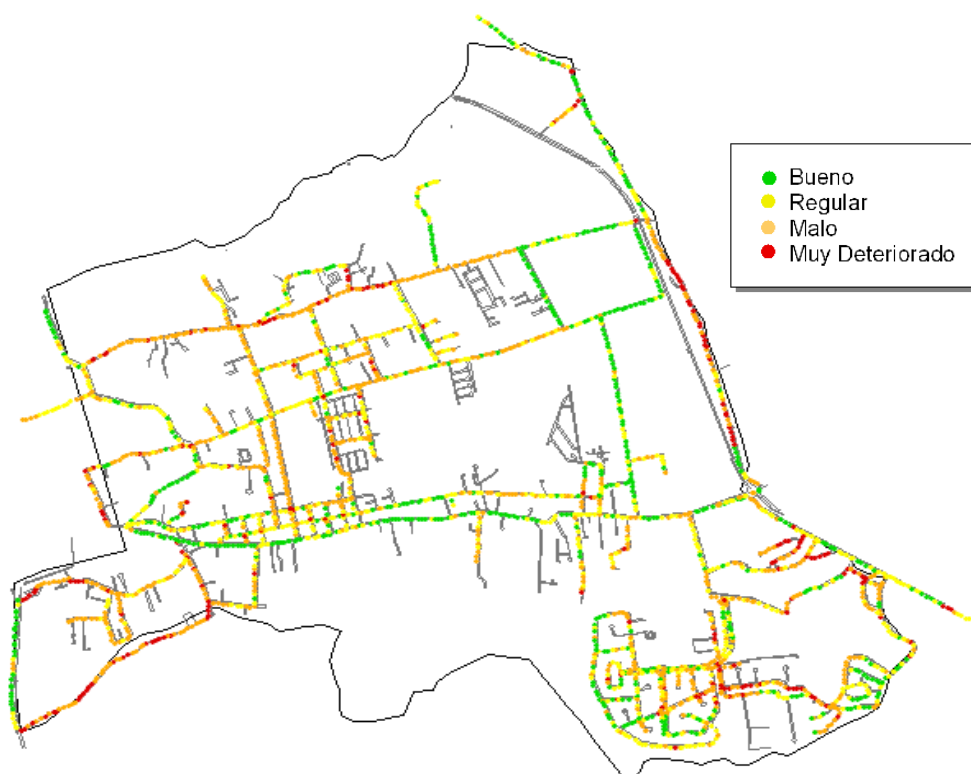


Figura 11. Calificación por deflexiones de la RVC de Belén (Fuente: López, 2009).

### **Identificación y Caracterización de los Tramos Homogéneos**

Los tramos homogéneos son secciones de la vía que poseen características similares, se definen con el objetivo de seccionar las vías para aplicar una única solución por tramo, ya que a nivel operativo no es funcional que el tipo o diseño de la intervención requerida varíe en pocos metros.

Se consideraron los siguientes criterios para determinar los tramos homogéneos, los cuales se basaron en los valores de las deflexiones corregidas obtenidas en la evaluación de la red en el año 2008:

- La longitud mínima de cada tramo es de 300 m.
- Los tramos con una relación de la desviación estándar y la media (s/m) mayor que 0.45 se considerará como tramo no uniforme.

Los tramos homogéneos finales se obtuvieron por medio del método de diferencias acumuladas establecido por el AASHTO 93, no obstante, al aplicar el análisis para las vías con longitudes inferiores a los 800 m se obtuvo tramos inferiores a los 300 m en los extremos de las vías, por lo que se optó por mantenerlas como un sólo tramo.

En total se obtuvo 51 tramos homogéneos, a continuación se representa gráficamente los tramos homogéneos de la RVC de Belén.

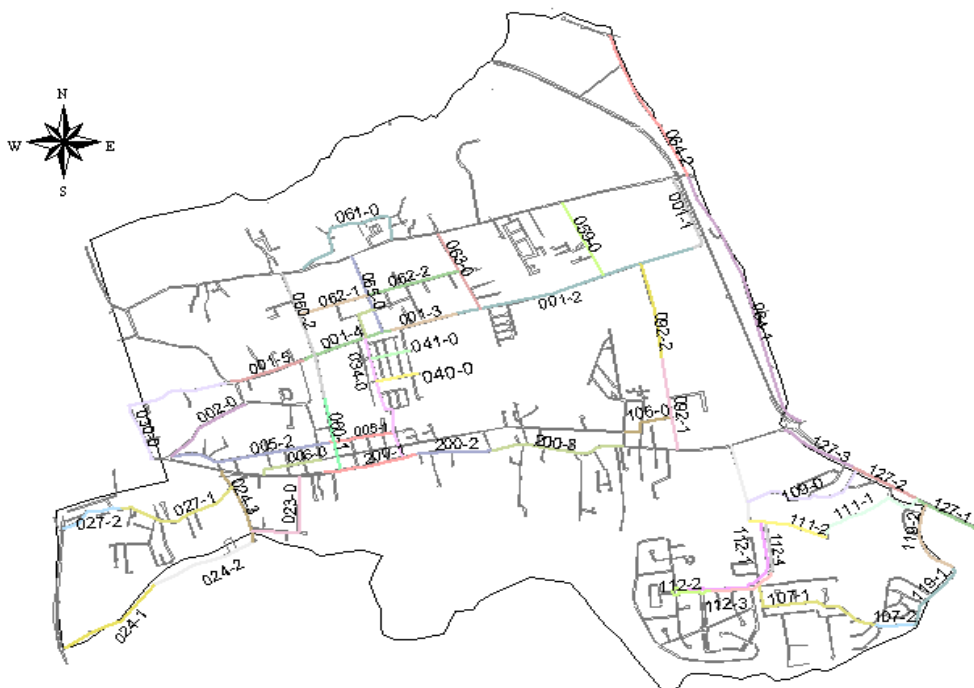


Figura 12. Tramos homogéneos de la RVC de Belén (Fuente: López, 2009).

### Deflexión e IRI característicos

Se utilizó el criterio de la deflexión característica para describir la condición de cada tramo con respecto a este parámetro, se aplicó un 80% de confianza lo que equivale a un valor de 0.841 veces la desviación estándar para una distribución normal, tal y como se muestra en la siguiente ecuación:

$$d_k = m + 0.841s$$

Donde:

- $d_k$ : es la deflexión patrón o característica.
- $m$ : promedio de las deflexiones del tramo homogéneo.
- $s$ : desviación estándar del tramo homogéneo.

Se utilizó el mismo criterio para obtener el IRI característico. A continuación se presentan los mapas seccionando la RVC con respecto a su deflexión e IRI característico.

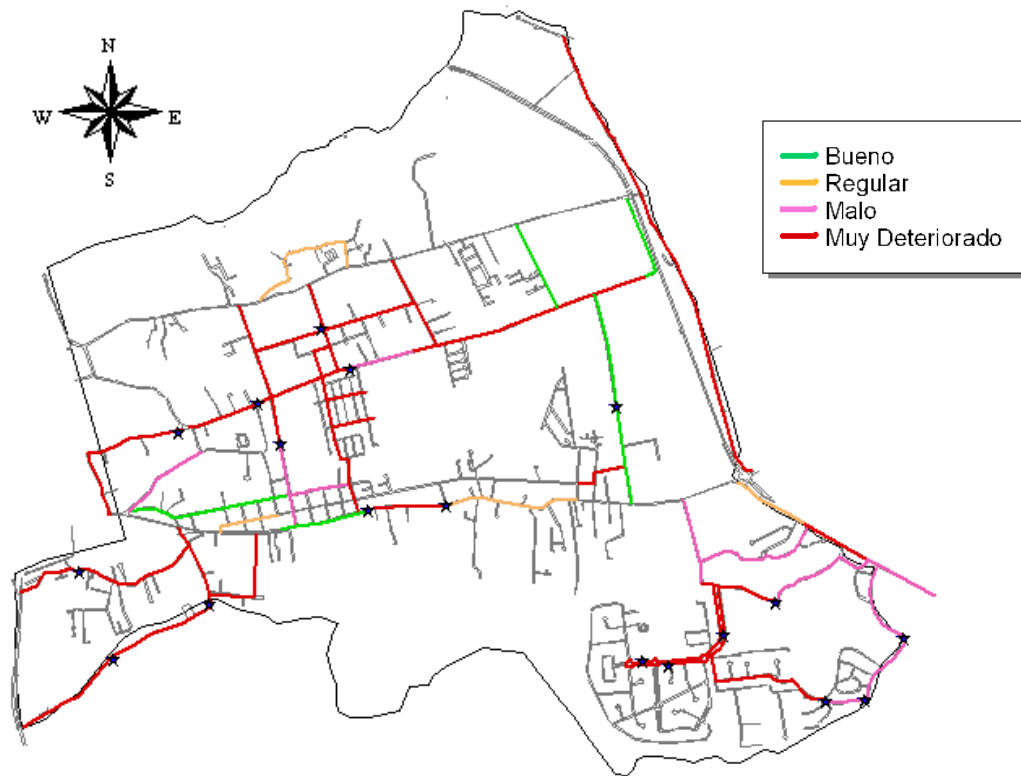


Figura 13. Clasificación de deflexión característica para cada tramo homogéneo (Fuente: López, 2009).

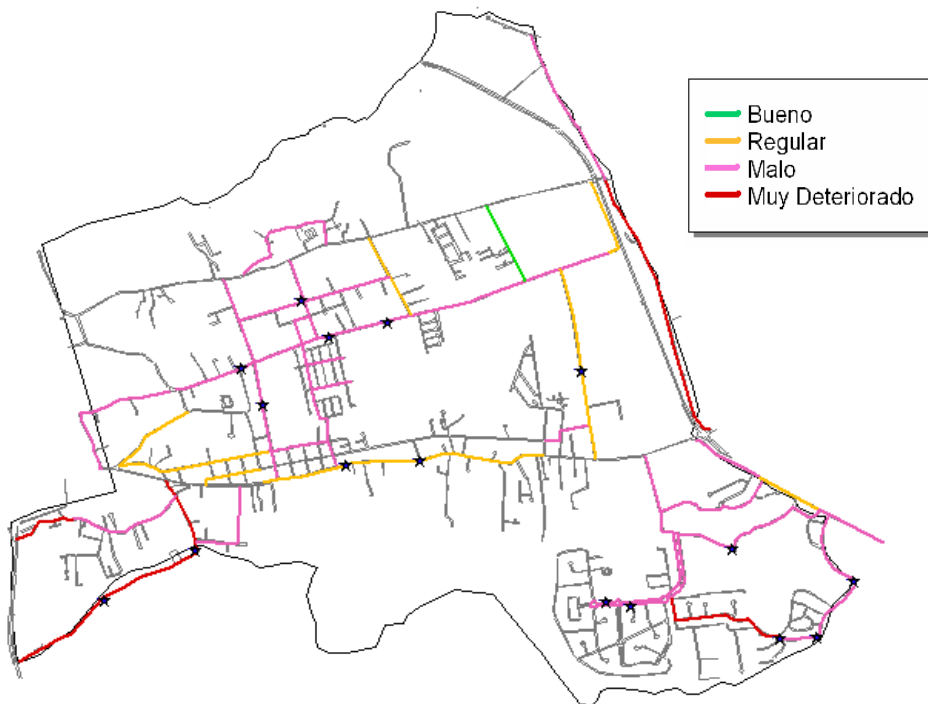


Figura 14. Clasificación de IRI característico para cada tramo homogéneo (Fuente: López, 2009).

La deflexión característica y el IRI característico dan una noción integral de la condición de los pavimentos de la RVC asfaltada de Belén, en las siguientes gráficas de pastel se muestra ésta información.

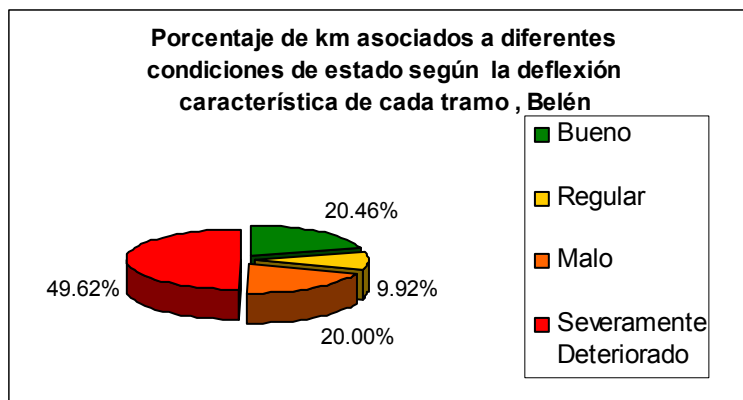


Figura 15. Porcentaje de kilómetros clasificados según deflexión característica (Fuente: López, 2009).

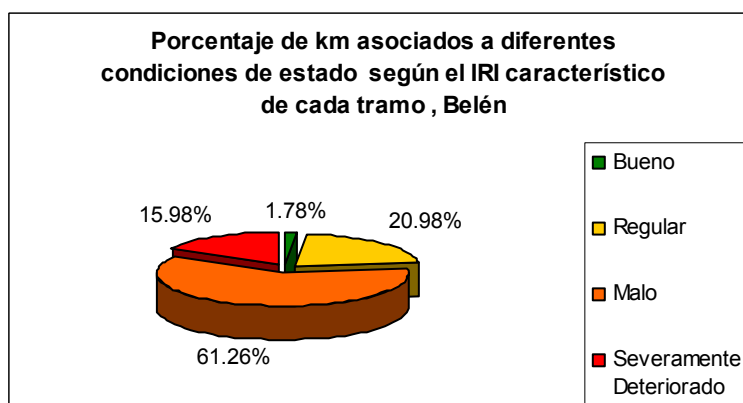


Figura 16. Porcentaje de kilómetros clasificados según IRI característico (Fuente: López, 2009).

### Indicadores de Condición

Para determinar la condición de cada tramo homogéneo fue necesario determinar el valor del SAI y del PRI para cada uno de ellos, ya que será caracterizada por el valor del índice de condición del pavimento (PRI) el cual está dado por la siguiente fórmula:

$$PCI = k_1 * SAI + k_2 * PRI$$

Se le asigna un peso del 50% a cada parámetro, de esta manera se evalúa la condición del pavimento con la misma magnitud de importancia para el estado estructural, definido por el SAI, como para la condición funcional, descrita por el valor de PRI.

Los valores de  $\text{área}_{\text{máx}}$  y  $\text{área}_{\text{mín}}$  utilizadas para determinar el SAI fueron definidos a partir de los datos de deflexiones de la evaluación de la red vial nacional realizada por el LanammeUCR en el año 2006.

Como resultado del estudio elaborado por personal del LanammeUCR se obtuvo un valor mínimo del área de 279,08 y un valor máximo de 682,07 para las condiciones

nacionales, siendo posible calcular el valor del SAI para cada uno de los tramos mediante la aplicación de la ecuación mostrada:

$$SAI = \left( \frac{Area_j - Area_{\min}}{Area_{\max} - Area_{\min}} \right) * 100$$

En cuanto a los valores mínimos y máximos del IRI utilizados para obtener el PRI asociado a cada tramo, se realizó un procedimiento similar al anterior, sin embargo, debido al comportamiento de los datos la distribución que más se ajustó fue la distribución gamma, utilizando la metodología de los momentos para obtener los parámetros necesarios  $\lambda$  y  $\alpha$  en función de la media y la varianza al aplicar las siguientes fórmulas:

$$\hat{\lambda} = \frac{\bar{X}}{\sigma^2} \qquad \hat{\alpha} = \frac{\bar{X}^2}{\sigma^2}$$

Donde:

$\bar{X}$  : Valor de la media.

$\sigma$  : Valor de la varianza.

Una vez obtenidos los parámetros  $\lambda$  y  $\alpha$  se obtuvo con "DIST.GAMMA.INV (probabilidad,  $\lambda$ ,  $\alpha$ )", una de las funciones que posee el programa de "Microsoft Excel", el valor mínimo y máximo de IRI, con una magnitud de 0,6764 para el valor mínimo y 6,3523 como valor máximo, utilizando una probabilidad de 0,025 y 0,975 respectivamente. Una vez obtenidos se puede aplicar la ecuación del PRI para caracterizar cada tramo, la cual se presenta a continuación:

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

En la Tabla 4 se muestran los rangos utilizados para asignar la condición del tramo homogéneo según la magnitud de PCI.

**Tabla 4.** Categorización de la vía según valor de PCI (Fuente: NBDOT, 2005).

<b>Categoría</b>	<b>PCI</b>
Muy Bueno	80-100
Bueno	60-80
Regular	40-60
Pobre	25-40
Muy Pobre	0-25

En la Figura 17 se muestra la clasificación general de los tramos homogéneos según la magnitud de PCI.



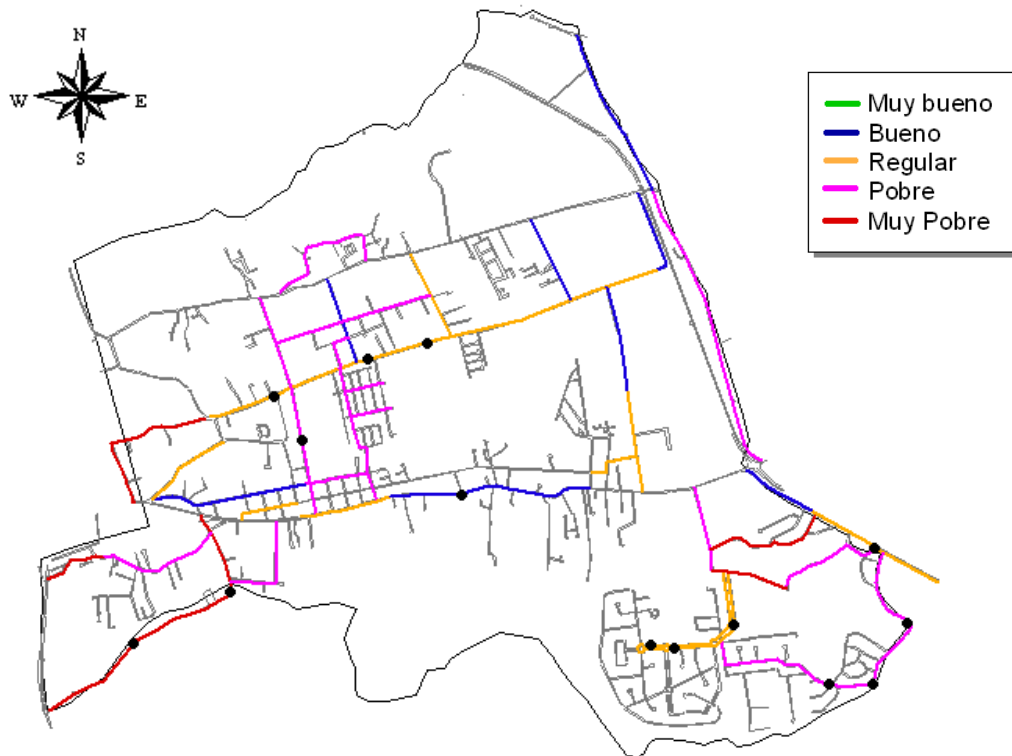


Figura 17. Clasificación de tramos homogéneos según PCI (Fuente: López, 2009).

En la Figura 18 se muestra la distribución de las vías por el Índice de Condición PCI.

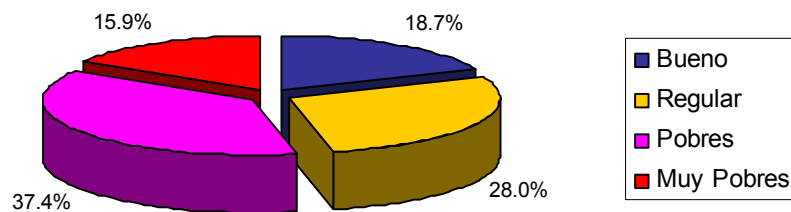


Figura 18. Porcentaje de kilómetros clasificados según PCI (Fuente: López, 2009).

Se destaca que no existe tramos que estén en la condición muy buenos (superior a 80 PCI).

## Análisis de Información Necesaria para la Optimización Lineal

### Curvas de Deterioro

Para realizar el análisis del cambio del estado actual de la red vial cantonal con respecto al paso del tiempo es necesario usar curvas de deterioro. En esta investigación se utilizaron las curvas generadas para Costa Rica por Luis Amador y Donath Mrawira en la Universidad de New Brunswick Canadá (2008).

Las curvas se basan en la información de deflectometría y medición de la rugosidad de la evaluación de la red vial nacional realizada por el LanammeUCR en los años 2004 y 2006. Las curvas fueron obtenidas por medio de la aplicación de un modelo estocástico. Estas consideran la cantidad de ejes equivalentes para establecer el tipo de tránsito: bajo (menor que 12800 ESALs) y medio (superior a los 12800 ESALs). Para utilizar el modelo fue necesario determinar el TPDA equivalente a los ESAL que establecen las curvas, utilizando las ecuaciones que se muestran a continuación:

$$ESAL_{dia} = \%tipodevehículo * TPDA * FC$$

$$ESAL_{diseño} = ESAL_{dis} * 365 * GF * DS * LDF$$

$$GF = \frac{(1+r)^y - 1}{r}$$

Donde:

- ESAL: Ejes equivalentes.
- FC: Factor Camión.
- GF: Factor de crecimiento vehicular.
- DS: Porcentaje de vehículos por carril.
- LDF: Factor de distribución por carril.
- r: Razón de crecimiento.
- y: Cantidad de años

Para determinar los  $ESAL_{dia}$  fue necesario recalculer los factores camión basados en los generados por el LanammeUCR, debido a que el tránsito vehicular sobre la red vial municipal fue medido por contadores electrónicos con un esquema de clasificación vehicular previamente determinado y diferente a la clasificación general utiliza en Costa Rica, los cuales se presentan en la siguiente tabla:

**Tabla 5.** Clasificación vehicular y porcentajes sobre la RVC (Fuente: López, 2009).

Clase según contadores	Tipo de vehículos	Factor Camión	Porcentaje de vehículos
4	C2+,C2,Bus C2	0.743	5.85%
5	C3	2.721	1.23%
6+7+8+9+10	T3-S2	2.102	0.86%

Utilizando valores críticos de LDF (igual a 1),  $D_s$  (con la misma distribución direccional en ambas direcciones,  $D_s=0.5$ ), un porcentaje de crecimiento igual al 4% y un periodo de 20 años se despejó el valor del TPDA, específico para la red de Belén, asociado a cada cantidad de ESALs.

**Tabla 6.** TPD asociado a valores máximos de ESALs (Fuente: López, 2009).

Nivel de tránsito	ESALs	TPDA
Bajo	12 800 000	24 800
Medio	30 000 000	58 100

Debido a que el máximo TPDA sobre la red vial cantonal es de aproximadamente 18 000 vehículos únicamente se utilizó la ecuación generada para tránsito bajo al ser este valor inferior al máximo establecido por esta curva.

Con la curva de deterioro es posible establecer una relación entre la edad del pavimento y el índice de condición del mismo, ya que no se cuenta con información directa acerca de la edad del mismo.

La curva está definida por tramos lineales, las ecuaciones que los describen están dadas para rangos de PCI las cuales se presentan a continuación:

**Tabla 7.** Ecuaciones de la edad de pavimento para caminos de bajo tránsito (Fuente: Amador, 2008).

Rango de PCI	Ecuación
0-42	$Edad = \frac{PCI - 167.91}{-6.196}$
42-100	$Edad = \frac{PCI - 101.11}{-2.887}$

Las vías regresan a una edad equivalente de 4 años al aplicar un tratamiento de preservación o rehabilitación. La reconstrucción regresa el pavimento a una edad igual a cero.

### Ventanas de Operación

Parte importante del modelo fue determinar el tipo de intervención adecuada (preservación, rehabilitación o reconstrucción) asociada a rangos de índice de condición (PCI) que presenta cada tramo. Los costos de realizar una reconstrucción menor (Base estabilizada y carpeta asfáltica) son muy similares a la de la reconstrucción total, debido al deterioro que presentan las capas granulares lo que conlleva a realizar reconstrucción total para todos aquellos tramos que poseen un PCI inferior a 40.

Los rangos utilizados para determinar las ventanas de operación son una adaptación de las establecidas por el departamento de transportes de New Brunswick, los cuales se muestran en la Figura 19.

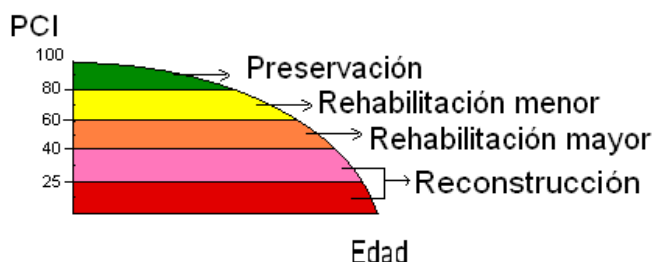


Figura 19. Ventanas de Operación (Fuente: NBDOT, 2005).

### Diseño y Costos de los Tratamientos

A manera de resumen se sintetiza el procedimiento para determinar los diseños de los diferentes tratamientos, para mayor detalle consultar *López, 2009*.

Se realizaron diferentes diseños (AASHO 93) según las solicitudes de carga en la red y el tipo de intervención requerida:

- Preservación (sobre capa no estructural).
- Rehabilitación menor.
- Rehabilitación mayor.
- Reconstrucción menor.
- Reconstrucción total.

Se realiza retrocálculo de los módulos resilientes de los materiales que conforman la estructura actual del pavimento. Además se corroboran los diseños por fatiga.

Los costos fueron obtenidos a partir de licitaciones realizadas por la Municipalidad de Belén y el CONAVI. Al realizar el análisis de costos se determina que la diferencia entre la reconstrucción menor y la total es mínima por lo que únicamente se aplica la reconstrucción total en caso de no ser requerida.

### **Generación del Modelo y Escenarios de Inversión**

Se define la función objetivo que se desea maximizar o minimizar, junto con las funciones que determinan las restricciones asociadas, recordando que todas estas deben ser lineales. En el modelo de la red en estudio se maximiza el índice de condición del pavimento (PCI) de toda la RVC, las principales restricciones son las presupuestarias.

También se agregan restricciones sobre la condición de las vías que presentan un mayor TPDA, su condición no puede disminuir, a través de la programación en el periodo de 20 años.

Otro de los aspectos que hay que considerar es la variación del dinero con respecto al tiempo, principalmente al ser un modelo que determina la condición del pavimento al aplicar un determinado escenario de inversión con un límite presupuestario asociado durante un periodo de 20 años plazo, para esto es necesario eliminar la tasa de inflación y de descuento nominal, para mayor detalle consultar la referencia *López, 2009*.

Para comparar los resultados obtenidos al aplicar diferentes restricciones al plan de inversión se realizan diferentes escenarios, además se programan y realizan diferentes corridas del programa "Woodstock", el cual realiza la programación lineal.

Las restricciones presupuestarias se escogieron de la siguiente manera:

- Inversión: ₡ 100 000 000
- Inversión: ₡ 150 000 000
- Inversión: ₡ 300 000 000
- Inversión: ₡ 400 000 000

La inversión actual consiste en ₡200 000 000, de los cuales ₡50 000 000, se usan para caminos terciarios, bacheo y emergencias. La idea es presentar los escenarios de inversión con el gasto actual y un escenario con gasto menor y dos con gasto mayor anual para poder comparar entre los mismos y observar las diferencias.

En la Figura 20 se observan las diferencias en las condiciones del pavimento para la RVC en términos del área pavimentada, se clasifican los pavimentos según la Tabla 4.

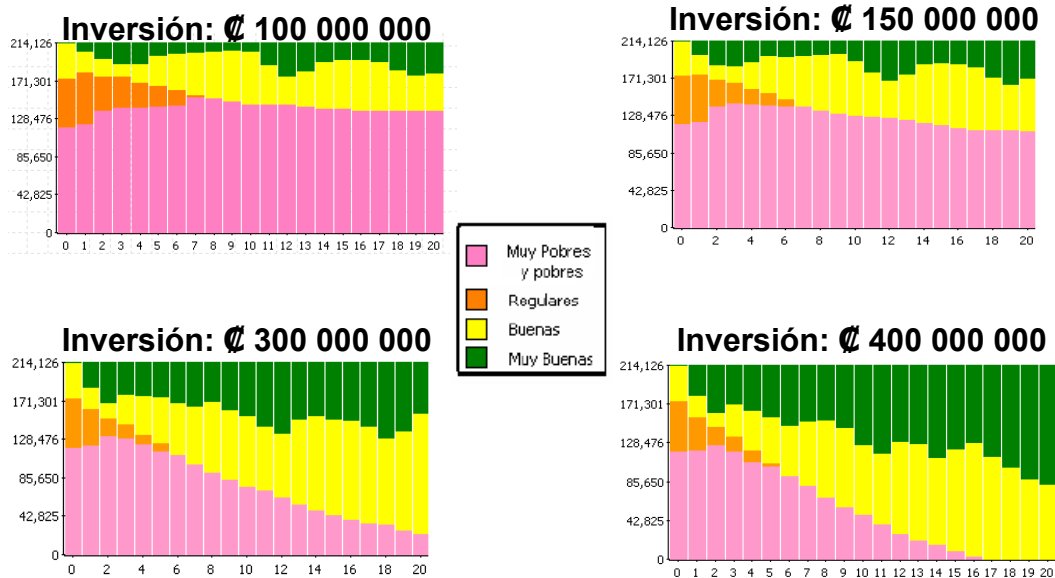


Figura 20. Condición de vías con diferentes escenarios de inversión (Fuente: López, 2009).

Se observa que con la inversión actual no se disminuye considerablemente la cantidad de vías en la condición muy pobre y pobre. En cambio, con la inversión de ₡ 300 000 000 sí se logra reducir el área pavimentada en condición pobre y muy pobre.

Con la inversión de ₡ 400 000 000, el área pavimentada en condición muy pobre y pobre desaparece completamente, y con la inversión de ₡ 100 000 000 aumenta levemente el área pavimentada en esa condición.

En la Figura 21 se aprecia la comparación de cómo varía la condición general de la RVC en los diferentes escenarios de inversión.

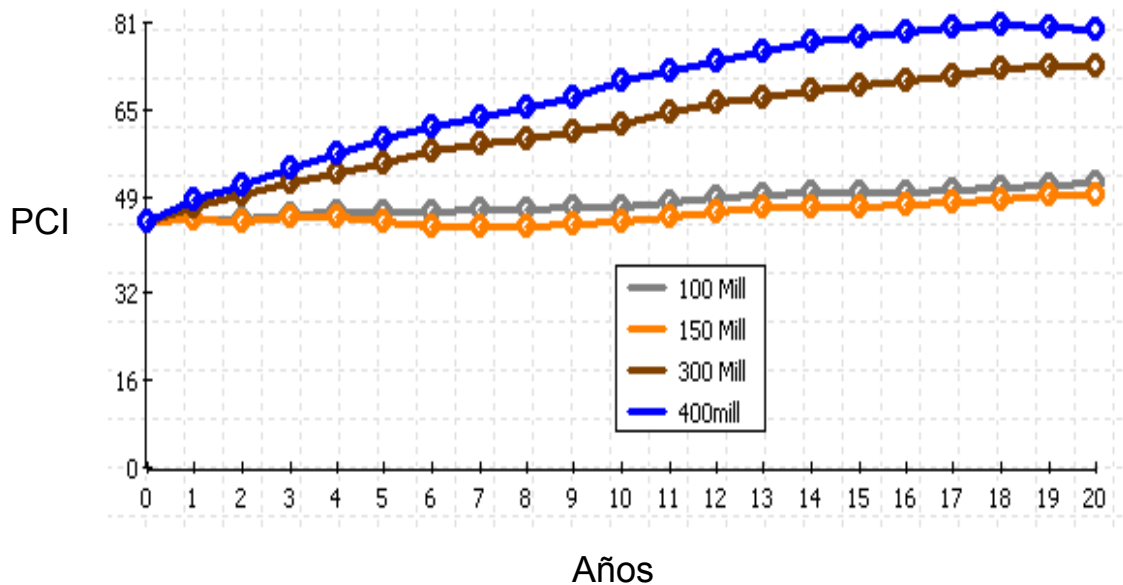


Figura 21. PCI promedio para diferentes escenarios de inversión (Fuente: López, 2009).

Se puede observar cuantitativamente como los escenarios de ₡ 300 000 000 y ₡ 400 000 000 aumentan considerablemente el PCI a través de los 20 años del período de estudio. Esto reitera nuevamente que la mejor decisión técnica sería poder aplicar alguno de éstos dos escenarios, para así incrementar la condición de la RVC.

A continuación se muestra una gráfica con un desglose de cómo se realizan las inversiones en los diferentes escenarios.

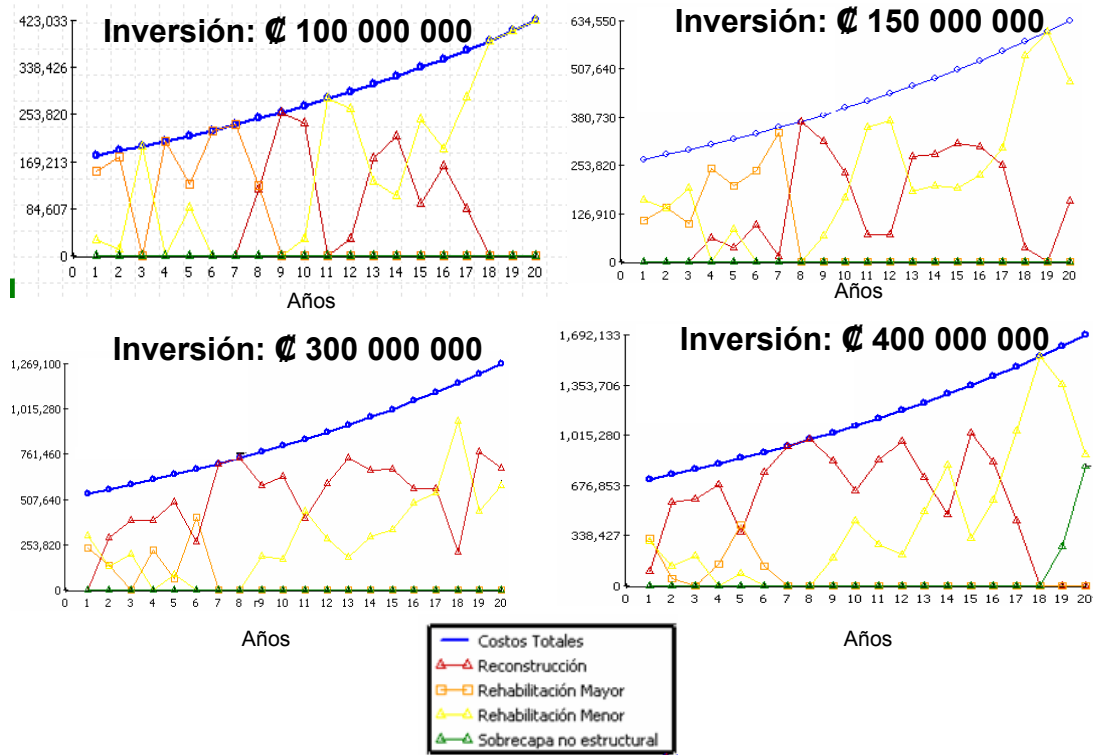


Figura 22. Desglose de los tratamientos para los escenarios de inversión (Fuente: López, 2009).

Se observa que en los escenarios de mayor inversión se invierte más en reconstrucción lo que permite elevar el PCI promedio de la RVC considerablemente.

## Conclusiones

Pese a que a simple vista la condición general de la red aparenta estar en buenas condiciones, al analizar la información suministrada en el presente informe se demuestra que poseen un deterioro importante. Tanto la evaluación estructural (FWD) como la funcional (IRI) lo evidencian, ya que ambas revelan valores superiores al 65% de su red en malas condiciones o severamente deteriorados, aspecto que se reflejará en un futuro disminuyendo considerablemente el nivel de servicio de la red.

Es necesario que la municipalidad determine el plan de gestión que impulsará, basándose en el presupuesto anual que invertirá en sus vías, el nivel de servicio que espera darle a sus usuarios y las políticas de mejoramiento del gobierno local.

El PCI representa indirectamente el valor del patrimonio de la RVC, esto permite concluir que los escenarios de *mayor inversión* (₡ 300 000 000 y ₡ 400 000 000) se recupera o aumenta el valor del patrimonio vial, por lo cuál se justifica técnicamente una mayor inversión para mejorar las condiciones generales de la red de manera sostenida.

Intervenir una vía, con el tratamiento adecuado en el momento justo permite maximizar los recursos con los que cuenta la UTGV, además de obtener mejor rentabilidad de sus inversiones al mejorar de manera sostenida la condición general de la red.

Modelar diferentes escenarios de inversión permite comparar el cambio en la condición de la red a largo plazo, siendo una herramienta útil para que la agencia de transportes defina el presupuesto que se invertirá el fin de cumplir los objetivos que esta posee.

## Recomendaciones

El presupuesto anual destinado al mantenimiento de la RVC de Belén debería aumentar anualmente, debido al cambio del valor del dinero en el tiempo. Se recomienda utilizar para realizar un ajuste anual los índices de construcción, específicamente los precios de asfalto, maquinaria, cemento, mano de obra y diesel; o utilizar la tasa de inflación y de descuento de la moneda nacional.

Es necesario contar con un presupuesto extra al destinado para el plan quinquenal, de manera que este se ejecute en vías terciarias, bacheo y/o emergencias. Esto con el fin de mantener el presupuesto necesario para la ejecución anual establecida en el plan.

La UTGV debería recolectar información referente a la red (IRI, FWD, conteos, etc.) de manera periódica, con el fin de retroalimentar la base de datos y mantener un control técnico del cambio en el estado en la red vial cantonal.

Es necesario que la municipalidad realice un diagnóstico en cuanto a la organización interna, para que el plan de conservación seleccionado por el municipio se ejecute manera eficaz. Por lo que es importante valorar si se cuenta con la cantidad necesaria de personal y si este se encuentra capacitado para realizar las labores pertinentes.

Además debe valorar si el equipo y el software que posee la Municipalidad es el indicado para realizar de manera eficiente las labores necesarias para el cumplimiento del plan de gestión. Se necesita contratar personal calificado para realizar las labores de:

- Auscultación visual periódica (VIZIR).
- Manejar las bases de datos de los sistemas de información geográficas.
- Conteos automáticos periódicos.
- Manejo de herramientas de optimización lineal (Excel).
- Inspectores para las obras de conservación y mantenimiento.

Se recomienda incluir otros aspectos como puentes, drenajes y alcantarillas dentro del sistema de gestión de infraestructura vial; además de implementar un sistema de aseguramiento de la calidad.

Es necesario hacer un análisis detallado de la organización de la UTGV, pues si el personal tiene que realizar otras funciones aparte de la dictaminada por el reglamento de la Ley N° 8114, esto podría interferir con la eficiencia y retardar los procesos de la gestión vial.



## Referencias

- Amador Luis, Mrawira Donath. (January 2008) Performance Modeling for Asset Management: What to when you only have two data points; University of New Brunswick.
- Hass, R.; Hudson, W.R.; Zaniewski, J. (1993). Modern Pavement Management. R.E. Krieger Publishing Company, Florida.
- LanammeUCR. Documentos y presentaciones varias.
- López Ramírez, Sharline. Sistema piloto de administración de pavimentos en la Municipalidad de Belén, Heredia. Proyecto de Graduación – Ingeniería Civil – San José, Costa Rica. Febrero, 2009.
- Proyecto N° UI-PC-03-08, Variaciones a los Rangos para la Clasificación Estructural de la Red Vial Nacional de Costa Rica. Unidad de Investigación en Infraestructura Vial (UIIVI), Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME), UCR, San José Costa Rica. Agosto, 2008.
- Solminihac H. (1998). Gestión de Infraestructura Vial; Editorial Universidad Católica de Chile, Chile.
- Wave; Department of Transportation of New Brunswick. (2005). Appendix Document, Asset Management Business Framework, New Brunswick Department of Transportation.