



Universidad de Costa Rica
Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales
LanammeUCR

Proyecto: LM-PI-GM-03-2014

**CLASIFICACIÓN DE LOS RESULTADOS
OBTENIDOS POR EL DEFLECTÓMETRO DE
IMPACTO PARA LA EVALUACIÓN
ESTRUCTURAL DE LA RED VIAL CANTONAL
DE COSTA RICA**

Preparado por:



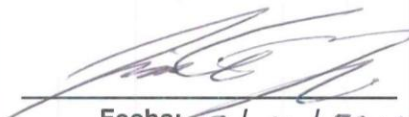
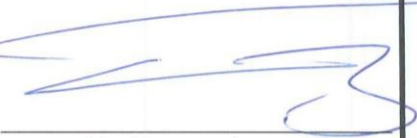
Unidad de Gestión Municipal

San José, Costa Rica

Abril, 2014



Información técnica del documento

1. Informe LM-PI-GM-03-14		2. Copia No. 1
3. Título y subtítulo: Clasificación de los resultados obtenidos por el deflectómetro de impacto para la evaluación estructural de la red vial cantonal de Costa Rica		4. Fecha del Informe: Abril, 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. Notas complementarias		
7. Resumen. Actualmente, en Costa Rica se han definido categorías para la clasificación de la capacidad estructural con base en los resultados de la deflectometría de impacto para la red vial nacional. Sin embargo, la realidad cantonal en cuanto a niveles de tránsito y estructuras de pavimentos es otra, por lo que es necesario generar nuevas categorías que reflejen las características de la red vial cantonal. En este estudio se presenta la metodología, análisis y resultados obtenidos en la determinación de las categorías para la clasificación de la capacidad estructural con base en las deflexiones obtenidas por el deflectómetro de impacto en rutas asfaltadas cantonales, las cuales se encuentran relacionadas con diferentes niveles de tránsito. Con la aplicación de las nuevas categorías se obtienen estrategias de intervención acorde a los niveles de servicio esperados y presupuestos Municipales.		
8. Palabras clave Deflectómetro, Pavimento, Estructural, Clasificación	9. Nivel de seguridad: Ninguno	10. Núm. de páginas: 61
11. Autores: Ing. Eliécer Arias Barrantes Unidad de Gestión Municipal Ing. Jaime Allen Monge, MSc Unidad de Gestión Municipal  Fecha: 9 / 4 / 2014  Fecha: 9 / 4 / 2014		
12. Colaboradores: Ariana Perera Lizano Efraín Sánchez Solano	13. Revisado por: Ing. Jaime Allen Monge, MSc Coordinador Unidad de Gestión Municipal  Fecha: 9 / 4 / 2014	14. Aprobado por: Ing. Guillermo Loría Salazar, MSc Coordinador General PITRA  Fecha: / /



ÍNDICE GENERAL

1	INTRODUCCIÓN.....	8
1.1	OBJETIVO GENERAL.....	9
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	9
1.3	ANTECEDENTES	9
1.4	JUSTIFICACIÓN	10
1.5	ALCANCE Y LIMITACIONES	11
2	METODOLOGÍA PROPUESTA.....	12
2.1	BASE DE DATOS DE SUELOS	13
2.1.1	<i>Selección de puntos de análisis</i>	<i>14</i>
2.1.2	<i>Identificación de tramos evaluados por Deflectómetro de Impacto.....</i>	<i>16</i>
2.1.3	<i>Retrocálculo de módulos.....</i>	<i>17</i>
2.2	BASE DE DATOS DE CONTEOS VEHICULARES	17
2.2.1	<i>Análisis de TPD y porcentaje de vehículos pesados</i>	<i>17</i>
2.2.2	<i>Estimación de Ejes Equivalentes</i>	<i>20</i>
2.3	PARÁMETROS DE DISEÑO.....	22
2.3.1	<i>Período de diseño.....</i>	<i>22</i>
2.3.2	<i>Confiabilidad</i>	<i>22</i>
2.3.3	<i>Índice de Serviciabilidad.....</i>	<i>23</i>
2.3.4	<i>Módulos de la subrasante</i>	<i>23</i>
2.3.5	<i>Coficiente de drenaje</i>	<i>23</i>
2.4	DISEÑO POR AASHTO 93.....	24
2.5	AJUSTES DEL SN DEL PAQUETE SEGÚN LA METODOLOGÍA DE VIDA REMANENTE.....	25
2.6	CARACTERIZACIÓN DEL PAQUETE ESTRUCTURAL	31
2.7	CÁLCULO DE DEFLEXIONES PARA CADA PAQUETE ESTRUCTURAL	35
2.8	IDENTIFICACIÓN DE DEFLEXIONES CARACTERÍSTICAS PARA CADA FLUJO VEHICULAR	39
3	ANÁLISIS DE RESULTADOS, HALLAZGOS Y OBSERVACIONES	44
3.1	CLASIFICACIÓN POR DEFLECTOMETRÍA PARA LA RVC	45



3.2	COMPARACIÓN DE LOS INTERVALOS DE CLASIFICACIÓN POR DEFLECTOMETRÍA PARA LA RVN Y LA RVC	45
4	CONCLUSIONES	46
5	RECOMENDACIONES	47
6	INVESTIGACIÓN SUGERIDA	48
7	REFERENCIAS	48
ANEXOS	50
A.	RETROCÁLCULO DE MÓDULOS RESILIENTES	50
B.	EJEMPLO DE CÁLCULO DE ESPESORES DE LA ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO CON AASHTO-93.	51
C.	EJEMPLO DE REDUCCIÓN DE LOS MÓDULOS RESILIENTES DE LAS CAPAS SEGÚN LOS SN AJUSTADOS PARA LA VIDA REMANENTE.	57
D.	NÚMERO ESTRUCTURAL EFECTIVO PARA LAS ESTRUCTURAS DISEÑADAS	58

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1.	FLUJOGRAMA DE METODOLOGÍA UTILIZADA EN EL ESTUDIO	13
FIGURA 2.	DISTRIBUCIÓN DE LOS VALORES DE CBR EN SITIO	14
FIGURA 3.	UBICACIÓN DE LOS SONDEOS ANALIZADOS	16
FIGURA 4.	HISTOGRAMA DE CADA INTERVALO Y PORCENTAJES ACUMULADOS DE LA ZONA URBANA CANTONAL	19
FIGURA 5.	HISTOGRAMA DE CADA INTERVALO Y PORCENTAJES ACUMULADOS DE LA ZONA RURAL CANTONAL	19
FIGURA 6.	VARIACIÓN DEL ÍNDICE DE SERVICIABILIDAD DE UN PAVIMENTO	26
FIGURA 7.	VARIACIÓN DE LA CAPACIDAD ESTRUCTURAL DE UN PAVIMENTO	26
FIGURA 8.	RELACIÓN ENTRE EL FACTOR DE CONDICIÓN Y LA VIDA REMANENTE DEL PAVIMENTO	28
FIGURA 9.	ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO	31
FIGURA 10.	VARIACIÓN DE DEFLEXIONES SEGÚN VIDA REMANENTE DEL PAVIMENTO	39



FIGURA 11. PRUEBA DE NORMALIDAD DE RANGOS T4 Y T5 PARA 0% DE VIDA REMANENTE.	40
FIGURA 12. ANOVA DE UN FACTOR PARA 0% DE VIDA REMANENTE.	41
FIGURA 13. TARJETA DE INFORME DE ANOVA DE UN FACTOR.	41
FIGURA 14. GRÁFICAS DE RESIDUOS PARA T1, T2, T3, T4 Y T5 CON 0% DE VIDA REMANENTE.	42
FIGURA 15. ANOVA DE UN FACTOR PARA RANGOS REAGRUPADOS CON 0% DE VIDA REMANENTE.	43
FIGURA 16. TARJETA DE INFORME DE ANOVA DE UN FACTOR.	43
FIGURA 17. GRÁFICAS DE RESIDUOS PARA T1, T2-T3 Y T4-T5 CON 0% DE VIDA REMANENTE.	44
FIGURA 18. INTERVALOS DE CLASIFICACIÓN DE FWD PARA LA RED VIAL CANTONAL.	45
FIGURA 19. COMPARACIÓN DE RANGOS DE CLASIFICACIÓN DE FWD PARA RVN Y RVC, RESPECTIVAMENTE.	46

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. VALORES DE CBR DE LOS SONDEOS SELECCIONADOS PARA EL ANÁLISIS.	15
TABLA 2. VALORES PROMEDIOS DE MÓDULO OBTENIDOS PARA LAS CAPAS DEL PAVIMENTO.....	17
TABLA 3. EJEMPLO DE DISTRIBUCIÓN DE TPD PARA LA ZONA URBANA Y RURAL, CANTONALES.	18
TABLA 4. INTERVALOS DE TPD Y EL PORCENTAJE DE VEHÍCULOS PESADOS ASOCIADO.....	18
TABLA 5. FACTORES CAMIÓN PROMEDIO PARA VEHÍCULOS PESADOS.....	21
TABLA 6. FACTORES CAMIÓN PROMEDIO PARA VEHÍCULOS PESADOS.....	21
TABLA 7. EJES EQUIVALENTES DE DISEÑO PARA EL ESCENARIO RURAL.....	22
TABLA 8. EJES EQUIVALENTES DE DISEÑO PARA EL ESCENARIO URBANO.....	22
TABLA 9. VALORES RECOMENDADOS DE M PARA MODIFICAR EL COEFICIENTE ESTRUCTURAL DE LA CAPA DE BASE Y SUBBASE EN PAVIMENTOS FLEXIBLES.	24



TABLA 10. NÚMERO ESTRUCTURAL REQUERIDO PARA 100% DE VIDA REMANENTE A 12 AÑOS.	25
TABLA 11. NÚMERO ESTRUCTURAL REQUERIDO PARA 100% DE VIDA REMANENTE A 15 AÑOS.	25
TABLA 12. SN AJUSTADOS A 60% DE VIDA REMANENTE CON UN PERIODO DE DISEÑO DE 12 AÑOS.	29
TABLA 13. SN AJUSTADOS A 20% DE VIDA REMANENTE CON UN PERIODO DE DISEÑO DE 12 AÑOS.	29
TABLA 14. SN AJUSTADOS A 0% DE VIDA REMANENTE CON UN PERIODO DE DISEÑO DE 12 AÑOS.	29
TABLA 15. SN AJUSTADOS A 60% DE VIDA REMANENTE CON UN PERIODO DE DISEÑO DE 15 AÑOS.	30
TABLA 16. SN AJUSTADOS A 20% DE VIDA REMANENTE CON UN PERIODO DE DISEÑO DE 15 AÑOS.	30
TABLA 17. SN AJUSTADOS A 0% DE VIDA REMANENTE CON UN PERIODO DE DISEÑO DE 15 AÑOS.	31
TABLA 18. VALORES DE MÓDULO RESILIENTE UTILIZADOS PARA CADA ESCENARIO.	32
TABLA 19. ESPESOR DE LAS CAPAS PARA EL ESCENARIO 1.	32
TABLA 20. ESPESOR DE LAS CAPAS PARA EL ESCENARIO 2.	33
TABLA 21. ESPESOR DE LAS CAPAS PARA EL ESCENARIO 3.	33
TABLA 22. ESPESOR DE LAS CAPAS PARA EL ESCENARIO 4.	34
TABLA 23. REDUCCIÓN DE LOS MÓDULOS A CAUSA DEL DETERIORO.	34
TABLA 24. DEFLEXIONES PARA 100% DE VIDA REMANENTE (MM X10 ⁻²) A 12 AÑOS.	35
TABLA 25. DEFLEXIONES PARA 100% DE VIDA REMANENTE (MM X10 ⁻²) A 15 AÑOS.	35
TABLA 26. DEFLEXIONES PARA 60% DE VIDA REMANENTE (MM X10 ⁻²) A 12 AÑOS. ...	36
TABLA 27. DEFLEXIONES PARA 60% DE VIDA REMANENTE (MM X10 ⁻²) A 15 AÑOS. ...	36
TABLA 28. DEFLEXIONES PARA 20% DE VIDA REMANENTE (MM X10 ⁻²) A 12 AÑOS. ...	37
TABLA 29. DEFLEXIONES PARA 20% DE VIDA REMANENTE (MM X10 ⁻²) A 15 AÑOS. ...	37
TABLA 30. DEFLEXIONES PARA 0% DE VIDA REMANENTE (MM X10 ⁻²) A 12 AÑOS.	38
TABLA 31. DEFLEXIONES PARA 0% DE VIDA REMANENTE (MM X10 ⁻²) A 15 AÑOS.	38



Resumen Ejecutivo

Con el fin de evaluar la capacidad estructural de la red vial cantonal de Costa Rica se ha utilizado la clasificación determinada para la red vial cantonal a través de la investigación “*Proyecto N° UI-PC-04-08: Desarrollo de herramientas de gestión con base en la determinación de índices de red vial nacional*”, publicado por el LanammeUCR en el 2008. Con el tiempo se ha observado que los flujos vehiculares en la red vial cantonal son menores que en la red vial nacional, lo que provocaba que la mayoría de rutas no pudieran ser analizadas adecuadamente con la metodología indicada.

A través de los años el LanammeUCR ha recopilado sistemáticamente información muy valiosa de diferentes redes viales cantonales, como son: flujo y distribución vehicular, tipo de suelo, espesores de capas en los pavimentos, CBR en subrasantes, medición de deflexiones en pavimentos, índice de regularidad internacional, entre otros. Esta información ha permitido alimentar bases de datos que brindan la posibilidad de conocer diferentes propiedades características de la red vial cantonal y con esto crear herramientas de gestión más precisas.

En el presente informe se detalla la metodología de análisis utilizada para determinar la clasificación estructural para pavimentos flexibles por medio de la medición de las deflexiones en campo, utilizando como insumo para la investigación, las bases de datos y ensayos realizados en la red vial cantonal de Costa Rica en los últimos años (2009-2013).

Como resultados relevantes de este análisis se obtienen tres categorías nuevas de flujo vehicular para clasificar los resultados del deflectómetro de impacto, módulos resilientes de las capas granulares y suelos a través del retrocálculo de módulos resilientes, representativas para los sitios seleccionados y una nueva gama de deflexiones posibles para cada categoría de flujo vehicular, considerando periodos de diseño, importancia y porcentaje de vehículos pesados acordes con la información recopilada de la red vial cantonal de Costa Rica.

La nueva clasificación permite un análisis más detallado en zonas con flujos vehiculares bajos y a su vez permite una evaluación más precisa para diferentes rutas de la red vial cantonal de Costa Rica.



1 INTRODUCCIÓN

A nivel mundial la evaluación de pavimentos es una herramienta muy efectiva para planificación de trabajos de conservación, mantenimiento y rehabilitación de vías con el objetivo de optimizar la inversión que se realiza en este campo.

Una evaluación periódica permite identificar problemas oportunamente, monitorear la evolución de deterioros y a su vez, planificar la inversión necesaria para mantener una buena condición o para mejorar dicha condición en un período determinado. Para realizar una evaluación periódica eficiente es necesario contar con herramientas adecuadas que permitan evaluar grandes distancias de manera rápida y con un procesamiento eficiente.

Actualmente en Costa Rica se ha utilizado la metodología de notas de calidad (Barrantes, Loría, Sibaja, & Porras, 2008a) para realizar una evaluación del estado general de los pavimentos existentes en la red vial nacional y red vial cantonal. En la red vial cantonal la aplicación de esta metodología se complementa con conteos vehiculares, sondeos a cielo abierto y CBR en sitio. La metodología como tal consiste en una serie de matrices en función del flujo vehicular, deflexiones con el deflectómetro de impacto (FWD por sus siglas en inglés) en el pavimento e índice de regularidad internacional (IRI por sus siglas en inglés); donde, para cada par FWD-IRI existe una condición asociada, que a su vez depende del flujo vehicular asociado.

Para aplicar esta metodología se creó una clasificación por deflexiones (asociada a capacidad estructural) para diferentes flujos vehiculares, estos flujos vehiculares están agrupados y se tienen diferentes intervalos que representan el tránsito típico de la red vial nacional. En la red vial cantonal se ha utilizado la misma clasificación por deflexiones que se utiliza en la red vial nacional, pero se ha observado con el tiempo, que existe muchas rutas con flujos vehiculares bajos que pueden no ajustarse al primer intervalo utilizado en la red vial nacional.

Esta investigación retoma los conceptos originales que dieron origen a la clasificación por deflexiones en la red vial nacional (Barrantes, Loría, Sibaja, & Porras, 2008a), tomando en cuenta la información que se ha recopilado en los últimos años y que ha dado origen a bases



de datos de conteos vehiculares, medición de espesores, CBR, tipos de subrasante y deflexiones; y como estas bases de datos pueden utilizarse para crear una nueva clasificación por deflexiones que se ajuste a tránsitos reales y a las condiciones observadas en la red vial cantonal.

1.1 Objetivo general

Generar una clasificación estructural de pavimentos con base en deflexiones para pavimentos ubicados en la red vial cantonal de Costa Rica.

1.2 Objetivos específicos

- Determinar los intervalos de flujo vehicular y los porcentajes de vehículos pesados representativos para las condiciones de tránsito actual en la red vial cantonal de Costa Rica, con base a conteos realizados en campo.
- Caracterizar los valores CBR en sitio en la red vial cantonal con el fin de identificar posibles sitios de análisis.
- Identificar los módulos resilientes de los materiales usados en las rutas seleccionadas mediante el retrocálculo de módulos.
- Realizar el diseño estructural de los pavimentos mediante la metodología de AASHTO 1993, para obtener el espesor de las diferentes capas en los diferentes escenarios planteados.
- Simular el deterioro de los pavimentos con la metodología de vida remanente y calcular la respuesta del mismo con un software de multicapa elástica.
- Realizar un análisis estadístico de los resultados con el fin de determinar una clasificación por deflexiones para la red vial cantonal de Costa Rica.

1.3 Antecedentes

La ley No. 8114 de Simplificación y Eficiencia Tributaria, asigna a la Universidad de Costa Rica, por intermedio del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales

Informe LM-PI-GM-03-14	Fecha de emisión: Abril de 2014	Página 9 de 61
------------------------	---------------------------------	----------------



(LanammeUCR), la responsabilidad de velar por la calidad y la eficiencia de la inversión pública destinada a conservar y desarrollar la red vial nacional. Con este propósito, el LanammeUCR realiza tareas de fiscalización, evaluación, investigación y transferencia de tecnología.

Para cumplir con estas disposiciones, el LanammeUCR realiza evaluaciones funcionales y estructurales de la red vial del país. Con el objetivo de realizar una evaluación de la red vial nacional con una mayor rigurosidad técnica, se desarrolló en el 2008 el *Proyecto especial: Propuesta de rangos para la clasificación de la Red Vial Nacional*, en el cual se determinó un rango de clasificaciones de la condición estructural y funcional.

Este proyecto utilizó la metodología AASHTO-93 para diseñar estructuras del pavimento con parámetros de diseño enfocados a la red vial nacional. Para tal efecto se utilizaron los datos de tránsito y los porcentajes de vehículos pesados del Departamento de Planificación Sectorial del Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT) para las rutas de la Red Vial Nacional y los resultados obtenidos de la Encuesta de Carga en Pavimentos de Costa Rica (LanammeUCR, 2007). Con el método de Vida Remanente (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993) se simuló el deterioro de la estructura de pavimento y se calcularon las deflexiones para cada condición, obteniendo intervalos de deflexiones característicos para diferentes flujos vehiculares.

1.4 Justificación

La ley No. 8603 reformó el artículo 6 de la ley No. 8114, adicionando el inciso j), que dispone: “Con la finalidad de garantizar la calidad de la red vial cantonal y en lo que razonablemente sea aplicable, las municipalidades y la Universidad de Costa Rica, por intermedio del LanammeUCR, podrán celebrar convenios que les permita realizar, en la circunscripción territorial municipal, tareas equivalentes a las establecidas en los incisos anteriores (La Gaceta 196, 2007).”

Para cumplir con lo estipulado en la ley se realizan convenios con las municipalidades del país para evaluar el estado de la red vial cantonal y determinar las intervenciones a nivel de red que puede aplicar para las vías analizadas.



Actualmente se utilizan intervalos para clasificar la capacidad estructural según la deflexión del pavimento, utilizando el deflectómetro de impacto. Esta clasificación tiene como inconveniente que fue determinada para las características de la red vial nacional en términos de importancia, flujo vehicular y distribución de vehículos pesados.

La red vial cantonal presenta condiciones que difieren de la nacional, por lo que la evidencia empírica hace suponer que las clasificaciones actuales podrían no ajustarse a la realidad técnica requerida y económica de los gobiernos locales, ya que se pueden originar intervenciones y trabajos de mantenimiento más severos y de mayor costo.

Por ello es de vital importancia realizar evaluaciones en la red vial cantonal acordes con la demanda real de los pavimentos administrados por los gobiernos locales, tipo de usuarios y solicitudes estructurales; de manera que las municipalidades puedan realizar una mejor planificación y mejores planes de inversión, optimizando los recursos económicos asignados para la conservación de las carreteras municipales.

1.5 Alcance y limitaciones

El presente estudio comprende el proceso de análisis para determinar una clasificación de la condición de pavimentos por deflexiones comparable con los resultados obtenidos con el deflectómetro de impacto de acuerdo con las características de la red vial cantonal del país.

La clasificación obtenida es aplicable solamente a pavimentos flexibles, dado que los datos de TPD, sondeos, deflectometría y metodología de diseño utilizada, corresponden a estructuras con este tipo capa de rodamiento. Los pavimentos rígidos presentan comportamientos distintos ante la aplicación de las cargas por lo que su evaluación debe realizarse con procedimientos alternativos, por lo tanto, la clasificación acá presentada no aplica para pavimentos rígidos.

Para simular el deterioro que sufren las estructuras se utiliza método de Vida Remanente, descrito en la guía AASHTO-93, este método es recomendado porque relaciona la disminución del número estructural (SN) conforme se van acumulado las cargas en su vida útil.



2 METODOLOGÍA PROPUESTA

Para obtener la clasificación de deflectometría para la red vial cantonal se desarrolló el flujograma de la figura 1. Este se divide en tres ejes principales de estudio, el análisis de la base de datos de conteos vehiculares, el análisis de la base de datos de suelos con los resultados de los ensayos de deflectometría y la determinación de los parámetros de diseño a utilizar según la metodología AASHTO 93.

A partir del análisis de estas bases de datos se obtuvieron los parámetros de diseño característicos para la red vial cantonal de Costa Rica con base a información y metodología utilizada. Posteriormente se realizaron diseños de pavimentos con la metodología de AASHTO-93 para condiciones ideales y se simuló el deterioro con el método de Vida Remanente para las condiciones deseadas. Las deflexiones que se emplearan en la generación de los intervalos de clasificación fueron calculados con un software de multicapa elástica para cada paquete estructural analizado y se agruparon los resultados con bases en un análisis estadístico con el fin de obtener la clasificación según el TPD, el detalle de los principales aspectos considerados en esta metodología se muestra en las siguientes secciones.

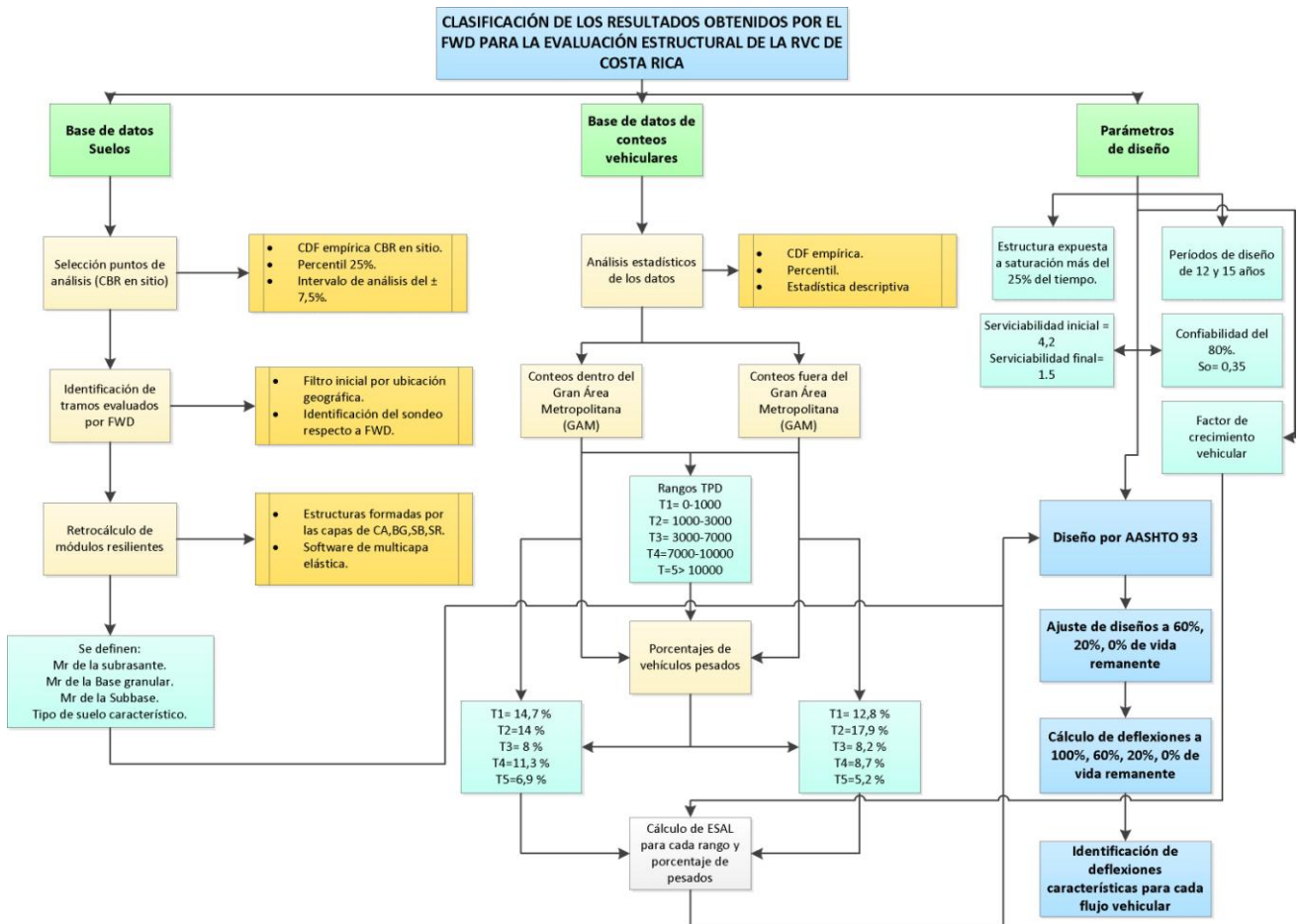


Figura 1. Flujograma de metodología utilizada en el estudio.

2.1 Base de datos de suelos

La base de datos de suelos se creó a través de los ensayos realizados en 17 municipalidades de Costa Rica, donde se cuenta con tipo de material, registro fotográfico, medición de espesores, tipos de suelo de la subrasante (Juárez & Rico, 2001) medición de CBR en sitio y la ubicación mediante sistemas de información geográficos (SIG).

En total se utilizaron 250 puntos de muestreo, donde se identificó que el tipo de subrasante característico corresponde a suelos finos (CH, MH, ML, CL).

2.1.1 Selección de puntos de análisis

La selección de los puntos de análisis se basó en el valor de CBR en sitio, el cual es una aproximación de la capacidad soportante de la subrasante según las condiciones predominantes al momento de la evaluación. Los valores de CBR de los 250 sondeos realizados no siguen una distribución normal, por lo que se trabajó con la distribución real de los datos (CDF empírica, ver figura 2). En este sentido se observa que hay una concentración de valores de CBR menores a 5,5% y que a medida que el CBR aumenta la cantidad de suelos con este valor disminuye.

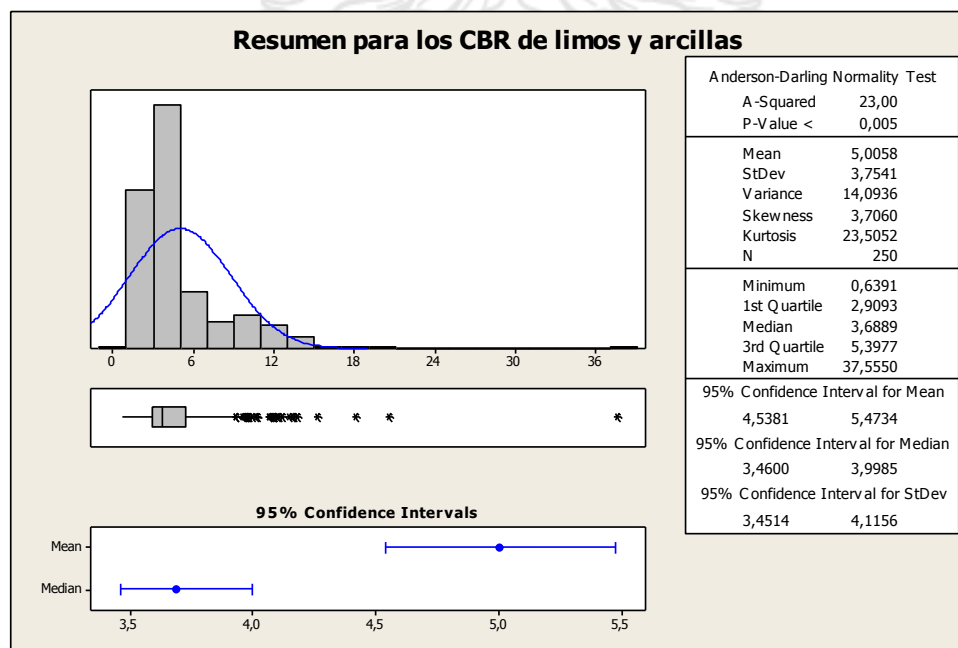


Figura 2. Distribución de los valores de CBR en sitio.

Mediante un análisis de datos que incluye estadística descriptiva básica, análisis de cuartiles, percentiles y análisis de curva de probabilidad acumulada (Montgomery e Runger, 2006) se consideró el valor de CBR tal que, más del 75% de los datos recolectados tuvieran un CBR mayor, el cual corresponde al percentil 25 con un valor de CBR de 2,9%.

Los sondeos seleccionados para el análisis corresponden al grupo de valores próximos a 2,9%, se seleccionó un intervalo de análisis $\pm 15\%$, es decir valores de CBR entre 2.2% y

3.6%. La tabla 1 muestra los 22 sondeos que cumplen los requerimientos establecidos. Los puntos seleccionados además de cumplir con el intervalo seleccionado de CBR, deben cumplir con otros parámetros como: poseer al menos una base granular o subbase, preferiblemente ambas capas granulares; no poseer algún material de relleno entre estas capas y la subrasante, ya que puede inducir a errores en el retrocálculo de módulos posterior; además poseer una carpeta asfáltica o tratamiento superficial como capa de ruedo.

Tabla 1. Valores de CBR de los sondeos seleccionados para el análisis.

Punto	CBR (%)	Punto	CBR (%)
1	3,18	12	3,04
2	3,17	13	2,80
3	3,00	14	2,99
4	3,14	15	2,96
5	3,14	16	2,78
6	2,98	17	3,06
7	2,91	18	2,85
8	2,79	19	2,98
9	3,14	20	2,84
10	2,76	21	2,77
11	2,96	22	2,88

En la figura 3 se observa la ubicación de los sondeos que presentan un CBR dentro del intervalo de análisis y que fueron seleccionados para el análisis de los ensayos de deflectometría realizados anteriormente en estos puntos. Los puntos se ubican tanto dentro del Gran Área Metropolitana de Costa Rica como fuera de esta.

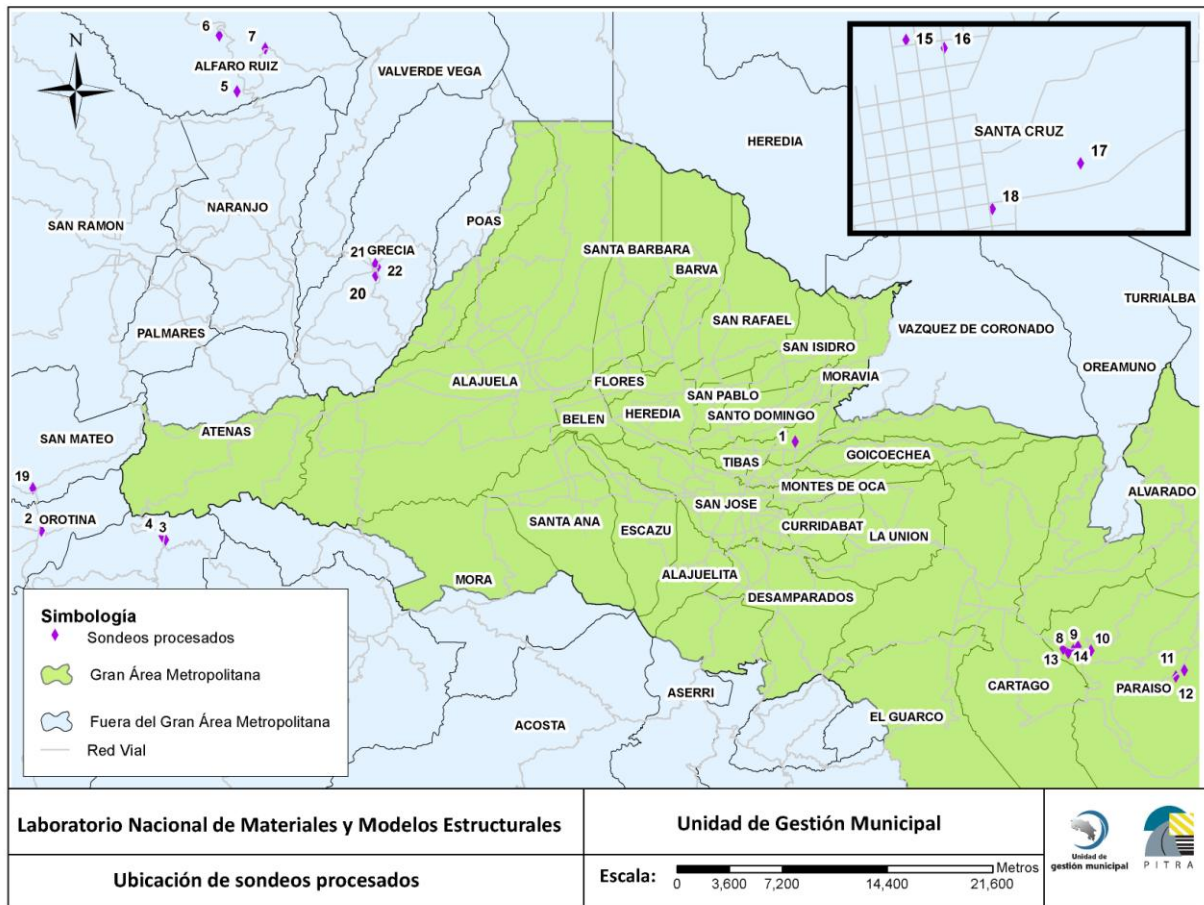


Figura 3. Ubicación de los sondeos analizados.

2.1.2 Identificación de tramos evaluados por Deflectómetro de Impacto

Para cada sondeo con un valor de CBR dentro del intervalo de análisis y que cumple con los requisitos mencionados en la sección anterior se ubicó la municipalidad y la ruta de ensayo de deflectometría a la que pertenecía, según su posición geográfica, seleccionando los puntos de medición del deflectómetro de impacto más cercanos, para esto previamente se realizó un análisis de la variabilidad de los resultados obtenidos y se obtuvo que los 6 puntos más cercanos disminuían el coeficiente de variación de los módulos (sección 2.1.3).

2.1.3 Retrocálculo de módulos

Para cada uno de los sondeos de análisis, asociados a una ruta de deflectometría se realizó un análisis de retrocálculo de módulos resilientes para todos los puntos que contenía la sección de carretera evaluada, posteriormente fue contrastado con el tramo homogéneo correspondiente y con diferentes combinaciones para obtener la cantidad de puntos que brindaban un menor coeficiente de variación. Con esto se calcularon los módulos promedios presentes en las capas granulares de la red vial cantonal.

Para el retrocálculo se utilizó el programa Elmod 6 (Versión 6.1.63) [software]. [Naverland 32: Dynatest International] y las deflexiones en cada uno de los geófonos del ensayo para cada punto, obteniendo como resultado los módulos de la tabla 2.

Tabla 2. Valores promedios de módulo obtenidos para las capas del pavimento.

Material	Módulo retrocalculado	Módulo para diseño	Especificación mínima CR-2010
Base granular	493 MPa (71320 psi)	306 Mpa (44220 psi)	194 MPa (28000 psi)
Subbase granular	140 MPa (20298 psi)	87 MPa (12585psi)*	104 MPa (15000 psi)
Subrasante	60 MPa (8632 psi)	21 MPa (3021 psi)	-

* Este valor no fue utilizado dado que no cumple con el valor mínimo.

Los módulos obtenidos por retrocálculo para cada capa se multiplican por un factor de ajuste para obtener los módulos para realizar el diseño. El factor utilizado para la base y subbase granular es de 0,62 y para la subrasante es de 0,35 (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2008).

2.2 Base de datos de conteos vehiculares

2.2.1 Análisis de TPD y porcentaje de vehículos pesados

Para realizar el análisis del TPD y el porcentaje de vehículos pesados se utilizó la base de datos de los conteos vehiculares realizados en 15 municipios del país, en total se utilizaron 270 conteos; 56 de ellos en vías dentro del Gran Área Metropolitana y 214 fuera de esta, en total acumulan más 895 000 vehículos contados. Con el análisis de los conteos fue posible

determinar los flujos vehiculares típicos y la cantidad de vehículos pesados asociados a estos flujos.

Con análisis de percentiles, cuartiles y curva CDF (*cumulative density function*) empírica se definieron cinco intervalos de TPD, que aplica tanto para la zona urbana como la rural, cantonal.

Tabla 3. Ejemplo de distribución de TPD para la zona urbana y rural, cantonales.

Percentil	Distribución de TPD para la zona urbana	Distribución de TPD para la zona rural	Descripción
100,0%	15977	15518	Máximo
99,5%	15428	14177	
97,5%	13837	9641	
90,0%	9760	7227	
75,0%	7085	3883	Tercer cuartil
50,0%	4027	1849	Mediana
25,0%	2016	773	Primer cuartil
10,0%	1288	297	
2,5%	447	121	
0,5%	314	83	
0,0%	297	79	Mínimo

Una vez definidos los intervalos de flujo vehicular se calculó el porcentaje de vehículos pesados en cada categoría. A partir de un análisis por estadístico básico se definió el percentil 95% de cada intervalo como un valor representativo para el porcentaje de vehículos pesados. Los resultados de flujo vehicular y porcentaje de pesados para la zona urbana y rural se detallan en la tabla 4.

Tabla 4. Intervalos de TPD y el porcentaje de vehículos pesados asociado.

Flujo vehicular		Porcentaje de pesados	
Símbolo	Intervalo TPD	Urbano	Rural
T1	0-1000	14,7%	12,8%
T2	1000-3000	14,0%	17,9%
T3	3000-7000	8,0%	8,2%
T4	7000-10000	11,3%	8,7%
T5	<10000	6,9%	5,2%

En la figura 4 y la figura 5 se muestra la distribución de los conteos vehiculares en las clases determinadas y cuantos conteos acumula cada categoría, para la zona urbana y rural respectivamente.

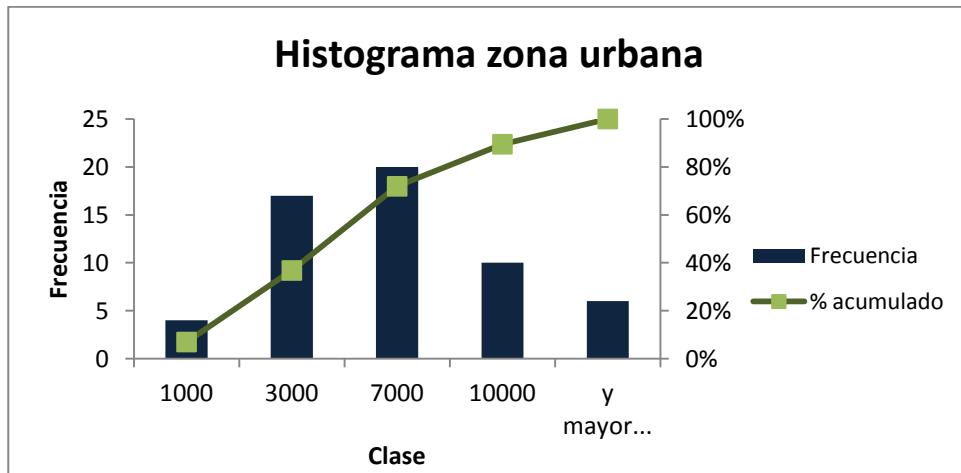


Figura 4. Histograma de cada intervalo y porcentajes acumulados de la zona urbana cantonal.

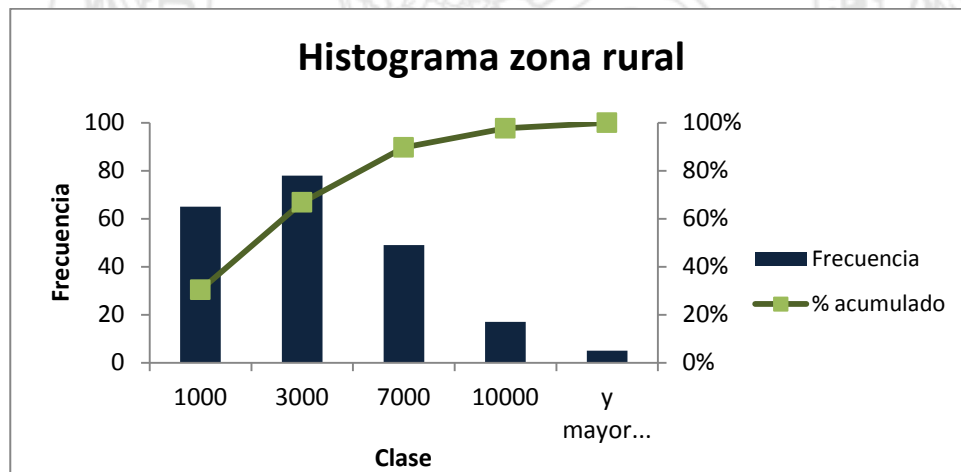


Figura 5. Histograma de cada intervalo y porcentajes acumulados de la zona rural cantonal.

2.2.2 Estimación de Ejes Equivalentes

Para estimar la cantidad de ejes equivalentes según cada categoría de flujo vehicular (T1, T2, T3, T4, T5) se utilizaron las ecuaciones 1, 2 y 3.

$$ESAL_{día} = \%pesados * TPDA * FC \quad (1)$$

$$ESAL_{diseño} = ESAL_{día} * 365 * GF * DS * LDF \quad (2)$$

$$GF = \frac{|(1 + r)^n - 1|}{r} \quad (3)$$

Donde

$ESAL_{día}$ = Cantidad de ejes de 8,2 toneladas en un día.

TPDA = Tránsito promedio diario anual.

FC = Factor camión.

$ESAL_{diseño}$ = Cantidad de ejes de 8,2 toneladas al final del período de diseño.

GF = Factor de crecimiento para una determinada cantidad de años.

DS = Porcentaje de vehículos por carril.

LDF = Porcentaje de distribución por carril.

r = Porcentaje de crecimiento anual.

n = cantidad de años (período de diseño).

Se utilizó un factor camión promedio estimado a partir de los resultados de estudio “Encuesta de Carga en Pavimentos de Costa Rica” (LanammeUCR, 2007), realizado en las principales rutas del país, ya que en las rutas municipales no se cuenta con encuestas de carga para estimar el factor camión.

Tabla 5. Factores camión promedio para vehículos pesados.

Ruta	Tipo de Vehículo	Factor Camión (TF)	
		Pick up	Pesados
Próspero Fernández ruta 27		0,011	1,77
Florencio del Castillo ruta 2		0,015	1,84
General Cañas ruta 1		0,011	1,31
Braulio Carrillo ruta 32		0,011	3,05
Naranjo Bernardo Soto ruta 1		0,011	2,44
Esparza Bernardo Soto ruta 1		0,011	3,19
San Carlos ruta 140		0,012	1,5
Pérez Zeledón ruta 2		0,012	1,31
Promedio		0,012	2,05
Desviación estándar		0,001	0,75

Para estimar el factor de crecimiento vehicular se analizaron los flujos vehiculares de las rutas más importantes de Costa Rica, producto de encuestas de cargas y datos de las estaciones de peaje. El resumen de los datos se puede observar en la tabla 6, el factor de crecimiento determinado para el análisis es de 7,3% anual.

Tabla 6. Factores camión promedio para vehículos pesados.

Porcentaje de crecimiento		
Ruta	Años	Porcentaje
Bernardo Soto, Ruta 1	9	6,40%
Florencio del Castillo, Ruta 2	16	5,90%
Próspero Fernández, Ruta 27	12	10,90%
Braulio Carrillo, Ruta 32	12	5,90%
Factor de crecimiento promedio		7,30%

Con el objetivo de simular una situación crítica se utilizó un porcentaje de vehículos por carril (DS) de 100% y una distribución por carril (LDF) de 80%, en la cual existe un carril por sentido y un 80% de los vehículos circulando en un sentido, lo cual es congruente a lo observado en la red vial cantonal de Costa Rica.

2.3 Parámetros de diseño

2.3.1 Período de diseño

Para el análisis se consideran dos periodos de diseño comunes en pavimentos flexibles en Costa Rica, 12 años y 15 años. Se considera que al final de este periodo la estructura del pavimento alcanza el PSI_{final} de 1,5. Utilizando los parámetros detallados anteriormente se obtuvieron los ESAL's de diseño para 12 y 15 años, mostrados anteriormente y en la sección 2.2.1 y 2.2.2 es posible estimar los ESAL de diseño para las diferentes condiciones seleccionadas.

Tabla 7. Ejes equivalentes de diseño para el escenario rural.

Flujo vehicular		% de pesados	Cantidad de pesados	ESAL de diseño	
Símbolo	TPD			12 años	15 años
T1	500	12,8%	64	3,40E+05	4,81E+05
T2	2000	17,9%	358	1,90E+06	2,69E+06
T3	5000	8,2%	410	2,18E+06	3,08E+06
T4	8500	8,7%	740	3,93E+06	5,55E+06
T5	12500	5,2%	650	3,46E+06	4,88E+06

Tabla 8. Ejes equivalentes de diseño para el escenario urbano.

Flujo vehicular		% de pesados	Cantidad de pesados	ESAL de diseño	
Símbolo	TPD			15 años	12 años
T1	500	14,7%	74	3,91E+05	5,52E+05
T2	2000	14,0%	280	1,49E+06	2,10E+06
T3	5000	8,0%	400	2,13E+06	3,00E+06
T4	8500	11,3%	961	5,11E+06	7,21E+06
T5	12500	6,9%	863	4,59E+06	6,48E+06

2.3.2 Confiabilidad

El nivel de confianza utilizado en los diseños es de 80%, este considera el tránsito, la importancia de la red vial cantonal, así como la incertidumbre del proceso constructivo que incide en el desempeño de la estructura. Con la distribución normal estándar y el nivel de confianza de 80% se obtiene un Z_R de -0,842; además se utilizó una desviación estándar S_o de 0,35.



2.3.3 Índice de Serviciabilidad

El índice de serviciabilidad de la metodología AASHTO-93 permite considerar el confort de los usuarios al transitar la carretera durante su vida útil. El índice de serviciabilidad inicial (P_o) considerado para el estudio es de 4,2, un valor común para pavimentos flexibles.

El índice de serviciabilidad final (P_t) normalmente se considera de 2,5 para altos volúmenes de tráfico y 2 para bajos volúmenes, pero como el estudio considera las condiciones críticas de desempeño de la estructura y la pérdida total de serviciabilidad, se utiliza un valor de 1,5 que se asocia con la falla según el criterio de la AASHTO-93.

Por lo tanto la pérdida de serviciabilidad (ΔPSI) es:

$$\Delta PSI = P_o - P_t = 4,2 - 1,5 = 2,7 \quad (4)$$

2.3.4 Módulos de la subrasante

Para definir los módulos de las capas del pavimento se consideró el resultado del retrocálculo (sección 2.1.3) y las especificaciones del CR-2010. El módulo de la subrasante utilizado para todos los escenarios de análisis es de 2915 psi, lo que supone materiales de subrasante de muy poca resistencia, pero son lo predominantes en la mayoría del territorio nacional.

2.3.5 Coeficiente de drenaje

Por las condiciones climáticas de Costa Rica y las prácticas constructivas, se considera una exposición a condiciones de humedad de saturación en más del 25% del tiempo y los sistemas de drenaje se consideran entre regulares y buenos; obteniendo un coeficiente de drenaje $C_d = 0,9$ según la tabla 9.

Tabla 9. Valores recomendados de m para modificar el coeficiente estructural de la capa de base y subbase en pavimentos flexibles.

Quality of Drainage	Percent of Time Pavement Structure is Exposed to Moisture Levels Approaching Saturation			
	Less Than 1%	1-5%	5-25%	Greater Than 25%
Excellent	1 40-1 35	1 35-1 30	1 30-1 20	1 20
Good	1 35-1 25	1 25-1 15	1 15-1 00	1 00
Fair	1 25-1 15	1 15-1 05	1 00-0 80	0 80
Poor	1 15-1 05	1 05-0 80	0 80-0 60	0 60
Very poor	1 05-0 95	0 95-0 75	0 75-0 40	0 40

Fuente: (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993).

2.4 Diseño por AASHTO 93

Se utiliza la metodología de AASHTO-93 para determinar el Número Estructural (SN) con la siguiente fórmula:

$$\log_{10} W_{18} = Z_r * S_o + 9.36 * \log_{10}(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log_{10} \left(\frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5} \right)}{\frac{0.40 + 1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + 2.32 * \log_{10} * M_r - 8.07 \quad (5)$$

Con:

W_{18} = Cantidad de ejes equivalentes de 8,2 toneladas.

Z_R = Desviación normal estándar para un nivel de confianza dado.

S_o = Desviación estándar promedio.

SN= Número estructural.

ΔPSI =Diferencia entre el PSI inicial y final.

M_r =Módulo de la subrasante (psi).

Realizando los cálculos correspondientes para cada combinación de módulos, flujo vehicular y de zona, se obtienen los números estructurales (SN) de la tabla 10 y la tabla 11.

Tabla 10. Número estructural requerido para 100% de Vida Remanente a 12 años.

	Rango de flujo vehicular	ESALS de diseño	SN requerido
Urbano	T1	3,91E+05	3,51
	T2	1,49E+06	4,20
	T3	2,13E+06	4,40
	T4	5,11E+06	4,93
	T5	4,59E+06	4,86
Rural	T1	3,40E+05	3,44
	T2	1,90E+06	4,33
	T3	2,18E+06	4,41
	T4	3,93E+06	4,76
	T5	3,46E+06	4,69

Tabla 11. Número estructural requerido para 100% de Vida Remanente a 15 años.

	Rango de flujo vehicular	ESALS de diseño	SN requerido
Urbano	T1	5,52E+05	3,67
	T2	2,10E+06	4,39
	T3	3,00E+06	4,60
	T4	7,21E+06	5,15
	T5	6,48E+06	5,08
Rural	T1	4,81E+05	3,61
	T2	2,69E+06	4,54
	T3	3,08E+06	4,62
	T4	5,55E+06	4,98
	T5	4,88E+06	4,90

2.5 Ajustes del SN del paquete según la metodología de Vida Remanente

Para el presente análisis fue necesario simular el deterioro del pavimento a través de su vida con el fin de estimar las deflexiones características en cada etapa del proceso de deterioro. El deterioro se define como la reducción de la capacidad del pavimento debido a las cargas vehiculares; los trabajos de rehabilitación y mantenimiento permiten aumentar la capacidad y extender la vida útil, este proceso se explica en la figura 6 y la figura 7.

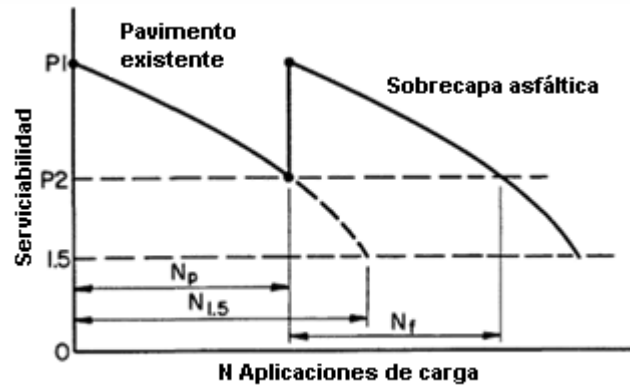


Figura 6. Variación del índice de serviciabilidad de un pavimento.

Fuente: (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993)

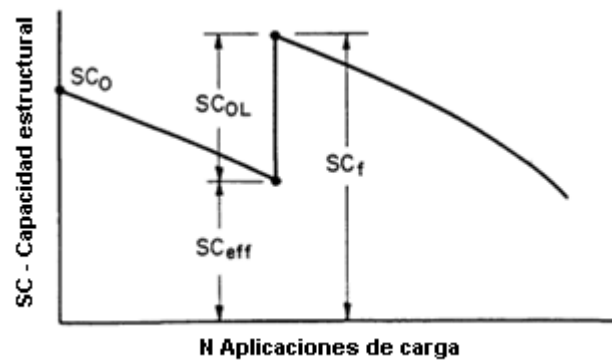


Figura 7. Variación de la capacidad estructural de un pavimento.

Fuente: (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993)

Se observa que inicialmente la estructura cuenta con un índice de serviciabilidad y una capacidad estructural, a medida que aumentan las cargas vehiculares aplicadas el pavimento se deteriora, reduciendo su capacidad estructural hasta un punto crítico, asociado a un índice de serviciabilidad final de 1,5.

Para conocer el estado del pavimento en un momento dado (SC_{eff}) la guía AASHTO-93 plantea tres métodos para evaluar la capacidad estructural del pavimento: mediante ensayo

de los materiales y evaluación visual, mediante pruebas de deflexión no destructivas y según el daño acumulado por fatiga.

La metodología de “Vida Remanente” sigue el concepto de daño por fatiga en las diferentes capas que componen el pavimento y depende directamente de la cantidad de repeticiones de carga que han pasado en un determinado momento, estas repeticiones degradan la estructura del pavimento limitando su capacidad para soportar las diferentes cargas solicitadas.

El concepto de “Vida remanente” se denota según la siguiente ecuación y puede observarse en la figura 8 (AASHTO, 1993).

$$RL = 100 * \left(1 - \frac{N_p}{N_{1,5}} \right) \quad (6)$$

RL= Vida remanente (0-100).

N_p = cantidad de ejes de 8,2 toneladas en un momento determinado.

$N_{1,5}$ = cantidad de ejes para la falla del pavimento (PSI=1,5).

Con el factor de condición se obtendrá la capacidad estructural del pavimento después de N_p repeticiones como un porcentaje de la capacidad original.

$$CF = \frac{SN_n}{SN_0} \quad (7)$$

SN_n = Capacidad estructural después de N_p repeticiones.

SN_0 = Capacidad estructural inicial, 100 % de vida remanente.

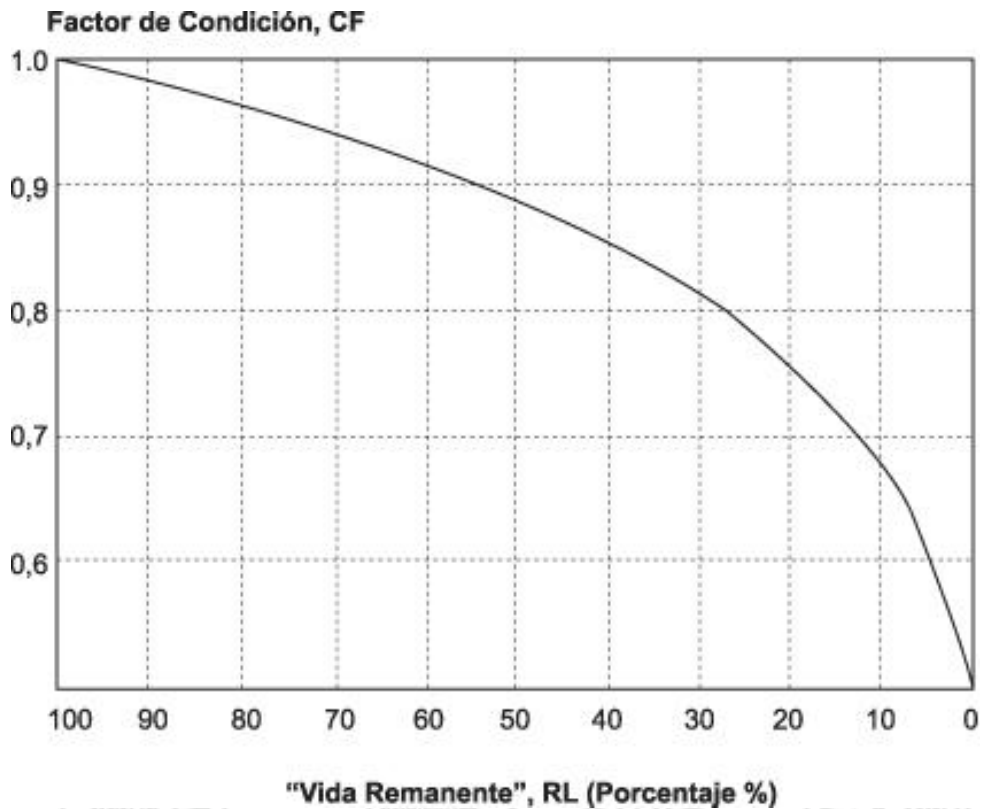


Figura 8. Relación entre el factor de condición y la vida remanente del pavimento

Fuente: (American Association of State Highway and Transportation Officials, 1993)

Se calculó el número estructura al 60%, 20% y 0% de vida remanente, esto debido a que se ha demostrado que el PSI en la mayoría de pavimentos disminuye lentamente en los primeros años y disminuye de forma acelerada al final del período de diseño, por lo tanto las deflexiones determinadas antes del 60% de vida remanente serán representativas de un pavimento en buen estado, las obtenidas en un pavimento con menos del 20% de vida remanente corresponderán un pavimento deteriorado y al 0% un pavimento fallado.

A continuación se muestra los SN ajustados según la metodología de vida remanente para cada escenario planteado.

Tabla 12. SN ajustados a 60% de vida remanente con un periodo de diseño de 12 años.

	Rango de flujo vehicular	ESALS de diseño	SN esperado
Urbano	T1	3,91E+05	3.18
	T2	1,49E+06	3.80
	T3	2,13E+06	3.98
	T4	5,11E+06	4.46
	T5	4,59E+06	4.40
Rural	T1	3,40E+05	3.11
	T2	1,90E+06	3.92
	T3	2,18E+06	3.99
	T4	3,93E+06	4.31
	T5	3,46E+06	4.24

Tabla 13. SN ajustados a 20% de vida remanente con un periodo de diseño de 12 años.

	Rango de flujo vehicular	ESALS de diseño	SN esperado
Urbano	T1	3,91E+05	2.42
	T2	1,49E+06	2.90
	T3	2,13E+06	3.03
	T4	5,11E+06	3.40
	T5	4,59E+06	3.35
Rural	T1	3,40E+05	2.37
	T2	1,90E+06	2.99
	T3	2,18E+06	3.04
	T4	3,93E+06	3.28
	T5	3,46E+06	3.23

Tabla 14. SN ajustados a 0% de vida remanente con un periodo de diseño de 12 años.

	Rango de flujo vehicular	ESALS de diseño	SN esperado
Urbano	T1	3,91E+05	1.21
	T2	1,49E+06	1.45
	T3	2,13E+06	1.52
	T4	5,11E+06	1.70
	T5	4,59E+06	1.68

	Rango de flujo vehicular	ESALS de diseño	SN esperado
Rural	T1	3,40E+05	1.19
	T2	1,90E+06	1.49
	T3	2,18E+06	1.52
	T4	3,93E+06	1.64
	T5	3,46E+06	1.62

Tabla 15. SN ajustados a 60% de vida remanente con un periodo de diseño de 15 años.

	Rango de flujo vehicular	ESALS de diseño	SN esperado
Urbano	T1	3,91E+05	3.32
	T2	1,49E+06	3.97
	T3	2,13E+06	4.16
	T4	5,11E+06	4.66
	T5	4,59E+06	4.60
Rural	T1	3,40E+05	3.27
	T2	1,90E+06	4.11
	T3	2,18E+06	4.18
	T4	3,93E+06	4.51
	T5	3,46E+06	4.43

Tabla 16. SN ajustados a 20% de vida remanente con un periodo de diseño de 15 años.

	Rango de flujo vehicular	ESALS de diseño	SN esperado
Urbano	T1	3,91E+05	2.53
	T2	1,49E+06	3.03
	T3	2,13E+06	3.17
	T4	5,11E+06	3.55
	T5	4,59E+06	3.50
Rural	T1	3,40E+05	2.49
	T2	1,90E+06	3.13
	T3	2,18E+06	3.19
	T4	3,93E+06	3.43
	T5	3,46E+06	3.38

Tabla 17. SN ajustados a 0% de vida remanente con un periodo de diseño de 15 años.

	Rango de flujo vehicular	ESALS de diseño	SN esperado
Urbano	T1	3,91E+05	1.27
	T2	1,49E+06	1.51
	T3	2,13E+06	1.59
	T4	5,11E+06	1.78
	T5	4,59E+06	1.75
Rural	T1	3,40E+05	1.24
	T2	1,90E+06	1.56
	T3	2,18E+06	1.59
	T4	3,93E+06	1.72
	T5	3,46E+06	1.69

2.6 Caracterización del paquete estructural

Para los números estructurales (SN) calculados al 100% de vida remanente y los módulos de cada material se determinaron los espesores de cada paquete estructural de manera que cumplieran con el SN inicial requerido. La estructura seleccionada para el análisis está compuesta por una carpeta asfáltica, una base granular, una subbase granular y la subrasante (ver figura 9).

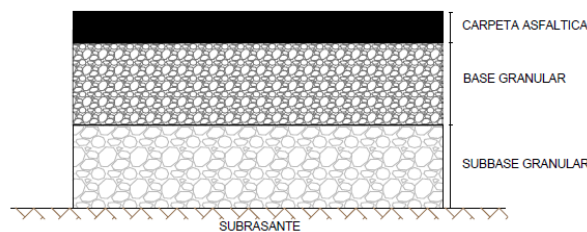


Figura 9. Estructura del pavimento.

Se plantearon cuatro escenarios variando los módulos con el fin de cubrir las características típicas de los materiales del país. Los valores de los módulos de las capas granulares se asignaron según el resultado del retrocálculo de módulos (Sección 2.1.3) y los valores mínimos recomendados por Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes CR-2010. Los módulos de la carpeta asfáltica se definieron

según los valores típicos de las carpetas del país, con variaciones entre 400000psi y 450000psi. Los distintos escenarios se muestran en la tabla 18.

Tabla 18. Valores de módulo resiliente utilizados para cada escenario.

Escenario	Módulo (psi) para diseño		
	Base granular	Subbase granular	Carpeta
1	28000	15000	400000
2	28000	15000	450000
3	44000	15000	400000
4	44000	15000	450000

Para cada escenario y con el SN para 100% de vida remanente se obtuvieron los espesores de las capas utilizando la metodología AASHTO-93. Ejemplos de cálculos se encuentran en el Anexo B.

En las siguientes tablas se muestra cada paquete estructural para el pavimento nuevo, cada tabla contiene los diferentes diseños para un mismo escenario (1, 2, 3 o 4) y cada fila contiene la información del paquete estructural para una condición de flujo vehicular a dos diferentes períodos de diseño (12 y 15 años). La simbología utilizada en los encabezados es la siguiente: “CA”= carpeta asfáltica, “BG”= base granular, “SB”= subbase granular.

Tabla 19. Espesor de las capas para el escenario 1.

	Intervalo de flujo vehicular	ESALS de diseño	Espesor (cm)					
			12 años			15 años		
			CA	BG	SB	CA	BG	SB
Urbano	T1	3,91E+05	10	15	31	11	15	31
	T2	1,49E+06	12	15	40	13	15	41
	T3	2,13E+06	13	15	41	14	15	42
	T4	5,11E+06	15	15	46	16	15	47
	T5	4,59E+06	15	15	44	15	15	50
Rural	T1	3,40E+05	10	15	29	10	15	33
	T2	1,90E+06	13	15	39	14	15	40
	T3	2,18E+06	13	15	41	14	15	42
	T4	3,93E+06	14	15	46	15	15	47
	T5	3,46E+06	14	15	44	15	15	45

Tabla 20. Espesor de las capas para el escenario 2.

	Intervalo de flujo vehicular	ESALS de diseño	Espesor (cm)					
			12 años			15 años		
			CA	BG	SB	CA	BG	SB
Urbano	T1	3,91E+05	9	15	32	10	15	32
	T2	1,49E+06	12	15	36	12	15	41
	T3	2,13E+06	12	15	41	13	15	42
	T4	5,11E+06	14	15	46	15	15	47
	T5	4,59E+06	14	15	44	14	15	50
Rural	T1	3,40E+05	9	15	30	10	15	30
	T2	1,90E+06	12	15	40	13	15	40
	T3	2,18E+06	12	15	42	13	15	42
	T4	3,93E+06	13	15	46	14	15	47
	T5	3,46E+06	13	15	44	14	15	45

Tabla 21. Espesor de las capas para el escenario 3.

	Intervalo de flujo vehicular	ESALS de diseño	Espesor (cm)					
			12 años			15 años		
			CA	BC	SB	CA	BC	SB
Urbano	T1	3,91E+05	8	15	32	9	15	32
	T2	1,49E+06	10	15	42	11	15	42
	T3	2,13E+06	11	15	43	12	15	44
	T4	5,11E+06	13	15	48	13	15	54
	T5	4,59E+06	13	15	46	13	15	52
Rural	T1	3,40E+05	8	15	31	9	15	31
	T2	1,90E+06	11	15	41	12	15	42
	T3	2,18E+06	11	15	43	12	15	44
	T4	3,93E+06	12	15	48	13	15	49
	T5	3,46E+06	12	15	46	13	15	47

Tabla 22. Espesor de las capas para el escenario 4.

	Intervalo de flujo vehicular	ESALS de diseño	Espesor (cm)					
			12 años			15 años		
			CA	BC	SB	CA	BC	SB
Urbano	T1	3,91E+05	8	15	30	8	15	34
	T2	1,49E+06	10	15	39	10	15	44
	T3	2,13E+06	10	15	44	11	15	45
	T4	5,11E+06	12	15	48	13	15	50
	T5	4,59E+06	12	15	47	12	15	52
Rural	T1	3,40E+05	8	15	28	8	15	33
	T2	1,90E+06	10	15	42	11	15	43
	T3	2,18E+06	10	15	44	11	15	45
	T4	3,93E+06	11	15	49	12	15	50
	T5	3,46E+06	11	15	47	12	15	48

Para simular el deterioro se realizó un proceso iterativo manteniendo constante los espesores y modificando los módulos de los materiales hasta que cumplieran con el SN ajustado, sin embargo, debe tenerse cuidado porque distintas combinaciones de módulos podrían dar como resultado una misma capacidad estructural. Se consideró que los materiales pierden su capacidad estructural en el mismo porcentaje de manera simultánea en todas las capas como un supuesto al facilitar la modelación

En la tabla 23 se presentan los módulos de los materiales ajustados y su porcentaje de reducción.

Tabla 23. Reducción de los módulos a causa del deterioro.

Capa	Vida remanente						
	100%	60%		20%		0%	
	Módulo (psi)	Módulo (psi)	% de reducción	Módulo (psi)	% de reducción	Módulo (psi)	% de reducción
CA	400000	326166	9,5	230936	23,8	114035	50,0
	450000	373667	9,5	265124	23,8	124393	50,0
BG	28000	24973	9,5	21010	23,8	15326	50,0
	44000	37595	9,5	29645	23,8	19212	50,0
SB	15000	13506	9,5	11527	23,8	8631	50,0

2.7 Cálculo de deflexiones para cada paquete estructural

Para calcular las deflexiones se utilizó el programa 3D-Move (Versión 2.1) [software].[Reno: University of Nevada], este es un software de análisis que puede simular el modelo de multicapa elástica, y así analizar el comportamiento del paquete estructural según las propiedades de los materiales, espesores de cada capa y la carga aplicada.

Para los análisis se simuló el ensayo del deflectómetro de impacto, utilizando un radio de carga de 15 cm, igual que el plato de carga del ensayo, y una carga 40 kN, lo que corresponde a una presión aplicada sobre el pavimento de 566 kPa.

Las siguientes tablas contienen las deflexiones de los distintos paquetes estructurales para 100%, 60%, 20% y 0% de vida remanente.

Tabla 24. Deflexiones para 100% de Vida Remanente ($\text{mm} \times 10^{-2}$) a 12 años.

	Rango de flujo vehicular	ESALS de diseño	Escenario de módulos			
			1	2	3	4
Urbana	T1	3,91E+05	99,96	102,72	101,37	101,64
	T2	1,49E+06	84,19	84,70	85,05	85,24
	T3	2,13E+06	79,70	81,71	78,40	82,36
	T4	5,11E+06	70,41	71,75	71,30	72,95
	T5	4,59E+06	71,35	72,73	72,23	73,43
Rural	T1	3,40E+05	101,76	104,55	102,25	103,51
	T2	1,90E+06	80,72	82,32	81,73	83,54
	T3	2,18E+06	79,70	81,13	80,58	82,36
	T4	3,93E+06	73,56	75,17	74,47	75,92
	T5	3,46E+06	74,56	76,20	75,45	76,91

Tabla 25. Deflexiones para 100% de Vida Remanente ($\text{mm} \times 10^{-2}$) a 15 años.

	Intervalo de flujo vehicular	ESALS de diseño	Escenario			
			1	2	3	4
Urbana	T1	5,52E+05	94,88	97,16	96,36	98,19
	T2	2,10E+06	79,70	81,71	81,15	82,36
	T3	3,00E+06	75,59	77,27	76,48	77,95
	T4	7,21E+06	67,06	68,16	68,71	68,87

	Intervalo de flujo vehicular	ESALS de diseño	Escenario			
			1	2	3	4
	T5	6,48E+06	68,64	69,93	69,54	71,13
Rural	T1	4,81E+05	98,26	98,88	97,20	99,02
	T2	2,69E+06	76,68	78,40	77,55	79,04
	T3	3,08E+06	75,59	77,27	76,48	77,95
	T4	5,55E+06	69,95	71,28	70,84	72,02
	T5	4,88E+06	70,88	72,24	71,76	72,95

Tabla 26. Deflexiones para 60% de Vida Remanente ($\text{mm} \times 10^{-2}$) a 12 años.

	Intervalo de flujo vehicular	ESALS de diseño	Caso			
			1	2	3	4
Urbano	T1	3,91E+05	107,73	110,32	109,65	109,49
	T2	1,49E+06	91,38	91,53	92,57	92,48
	T3	2,13E+06	86,60	88,42	87,88	89,47
	T4	5,11E+06	76,89	78,00	78,09	79,60
	T5	4,59E+06	77,84	78,97	79,03	80,08
Rural	T1	3,40E+05	109,45	112,14	110,54	111,35
	T2	1,90E+06	87,77	89,01	89,03	90,62
	T3	2,18E+06	86,60	87,83	87,88	89,47
	T4	3,93E+06	80,30	81,61	81,56	82,80
	T5	3,46E+06	81,30	82,63	82,54	83,79

Tabla 27. Deflexiones para 60% de Vida Remanente ($\text{mm} \times 10^{-2}$) a 15 años.

	Intervalo de flujo vehicular	ESALS de diseño	Caso			
			1	2	3	4
Urbano	T1	3,91E+05	102,40	104,38	104,38	106,06
	T2	1,49E+06	86,60	88,42	88,44	89,47
	T3	2,13E+06	82,32	83,68	83,57	84,82
	T4	5,11E+06	73,39	74,15	75,51	75,23
	T5	4,59E+06	75,12	76,18	76,34	77,79
Rural	T1	3,40E+05	106,01	106,08	105,23	106,89
	T2	1,90E+06	83,40	84,79	84,63	85,90
	T3	2,18E+06	82,32	83,68	83,57	84,82

	Intervalo de flujo vehicular	ESALS de diseño	Caso			
			1	2	3	4
	T4	3,93E+06	76,44	77,53	77,65	78,67
	T5	3,46E+06	77,35	78,47	78,56	79,60

Tabla 28. Deflexiones para 20% de Vida Remanente ($\text{mm} \times 10^{-2}$) a 12 años.

	Intervalo de flujo vehicular	ESALS de diseño	Caso			
			B	D	E	F
Urbano	T1	3,91E+05	122,55	125,48	125,69	125,22
	T2	1,49E+06	104,95	104,71	107,06	106,61
	T3	2,13E+06	99,62	101,55	101,74	103,54
	T4	5,11E+06	88,94	90,05	90,83	92,43
	T5	4,59E+06	89,90	91,04	91,79	92,93
Rural	T1	3,40E+05	124,33	127,31	126,60	127,12
	T2	1,90E+06	100,81	102,14	102,92	104,71
	T3	2,18E+06	99,62	100,95	101,74	103,54
	T4	3,93E+06	92,80	94,14	94,81	96,19
	T5	3,46E+06	93,81	95,18	95,82	97,21

Tabla 29. Deflexiones para 20% de Vida Remanente ($\text{mm} \times 10^{-2}$) a 15 años.

	Intervalo de flujo vehicular	ESALS de diseño	Caso			
			1	2	3	4
Urbano	T1	3,91E+05	116,63	118,82	119,71	121,71
	T2	1,49E+06	99,62	101,55	102,32	103,54
	T3	2,13E+06	94,85	96,25	96,87	98,25
	T4	5,11E+06	85,03	85,74	88,19	87,52
	T5	4,59E+06	87,13	88,20	89,04	90,59
Rural	T1	3,40E+05	120,84	120,54	120,57	122,56
	T2	1,90E+06	95,95	97,38	97,96	99,36
	T3	2,18E+06	94,85	96,25	96,87	98,25
	T4	3,93E+06	88,48	89,58	90,37	91,49
	T5	3,46E+06	89,41	90,53	91,31	92,43

Tabla 30. Deflexiones para 0% de Vida Remanente ($\text{mm} \times 10^{-2}$) a 12 años.

	Intervalo de flujo vehicular	ESALS de diseño 12 años	Caso			
			B	D	E	F
Urbano	T1	3,91E+05	158,25	163,08	164,48	164,41
	T2	1,49E+06	138,22	138,41	142,82	142,70
	T3	2,13E+06	131,76	135,22	136,18	139,57
	T4	5,11E+06	119,08	121,49	122,86	125,86
	T5	4,59E+06	120,05	122,49	123,84	126,36
Rural	T1	3,40E+05	160,03	164,91	165,41	166,36
	T2	1,90E+06	132,95	135,82	137,38	140,76
	T3	2,18E+06	131,76	134,62	136,18	139,57
	T4	3,93E+06	123,91	126,63	128,00	130,85
	T5	3,46E+06	124,92	127,68	129,02	131,88

Tabla 31. Deflexiones para 0% de Vida Remanente ($\text{mm} \times 10^{-2}$) a 15 años.

	Intervalo de flujo vehicular	ESALS de diseño	Caso			
			1	2	3	4
Urbano	T1	3,91E+05	151,08	155,02	157,01	160,84
	T2	1,49E+06	131,76	135,22	136,76	139,57
	T3	2,13E+06	125,97	128,76	130,08	132,94
	T4	5,11E+06	114,29	116,19	120,19	119,75
	T5	4,59E+06	117,26	119,62	121,04	123,98
Rural	T1	3,40E+05	156,55	156,75	157,88	161,70
	T2	1,90E+06	127,07	129,91	131,18	134,06
	T3	2,18E+06	125,97	128,76	130,08	132,94
	T4	3,93E+06	118,62	121,02	122,39	124,89
	T5	3,46E+06	119,55	121,98	123,35	125,86

La tabla 32 presenta un resumen con las deflexiones promedio para cada intervalo de flujo vehicular y para cada caso de vida remanente.

Tabla 32. Deflexiones promedio por intervalo de flujo vehicular y según vida remanente.

Intervalo de flujo vehicular	Deflexiones (mm x10 ²)			
	Vida remanente			
	100%	60%	20%	0%
T1	99,86	107,63	122,85	160,24
T2	81,50	88,50	101,97	135,91
T3	78,78	85,81	99,05	132,52
T4	71,40	77,96	90,41	122,25
T5	72,49	79,10	91,64	123,68

2.8 Identificación de deflexiones características para cada flujo vehicular

A partir de las deflexiones calculadas se identificaron los comportamientos característicos para las diferentes clasificaciones de flujo vehicular. En la figura 10 se presenta gráficamente las deflexiones promedio obtenidas para cada intervalo de flujo vehicular, así como su variación al disminuir la vida remanente.

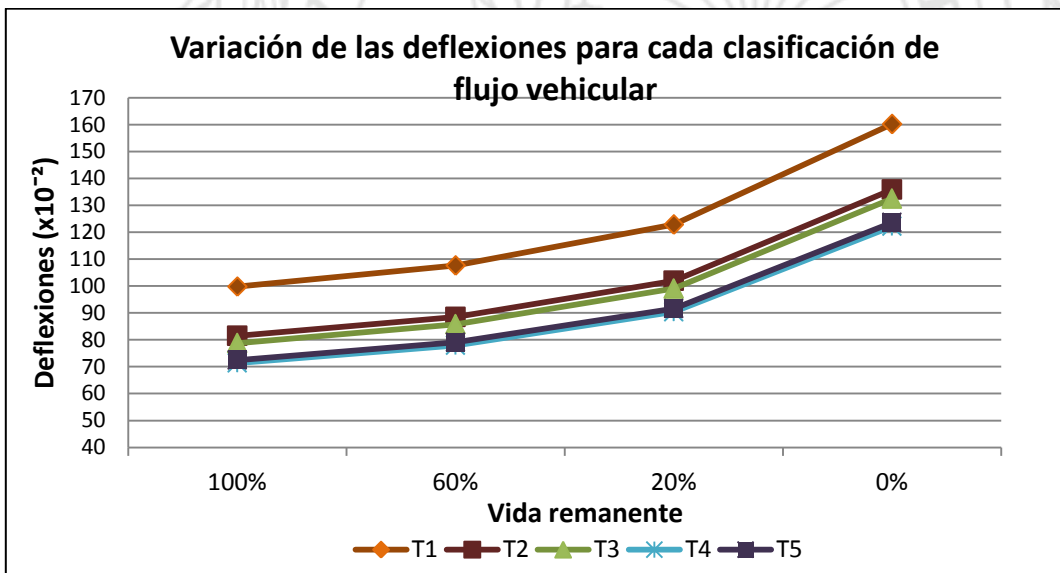


Figura 10. Variación de deflexiones según vida remanente del pavimento.

Para determinar las diferencias entre las clasificaciones de flujo vehicular se realizó un análisis ANOVA de un factor. Para tal efecto se verificó la normalidad de los datos para cada

caso de flujo vehicular con estadística descriptiva, para la zona rural y urbana, para 12 y 15 años de cada clasificación.

La figura 11 presenta la prueba de normalidad para dos casos particulares: intervalos vehiculares T4 y T5, sin embargo la prueba se realizó para todos los intervalos y porcentajes de vida remanente, demostrando la normalidad de los datos.

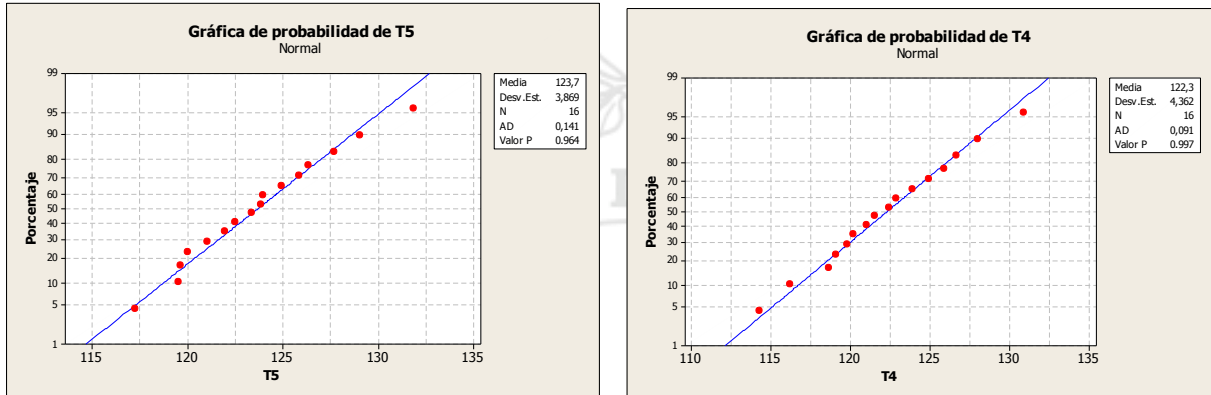


Figura 11. Prueba de normalidad de rangos T4 y T5 para 0% de vida remanente.

Con el ANOVA que se presenta en la figura 12 se determinó que la muestra T1 es diferente al resto de las muestras, además la muestra T2 es diferente a la muestra T1, T4 y T5, la muestra T3 es diferente de las muestras T1, T4 y la T5, la T4 es diferente de las muestras T3, T2 y T1, y por último la muestra T5 difiere de las muestras T1, T2 y T3.

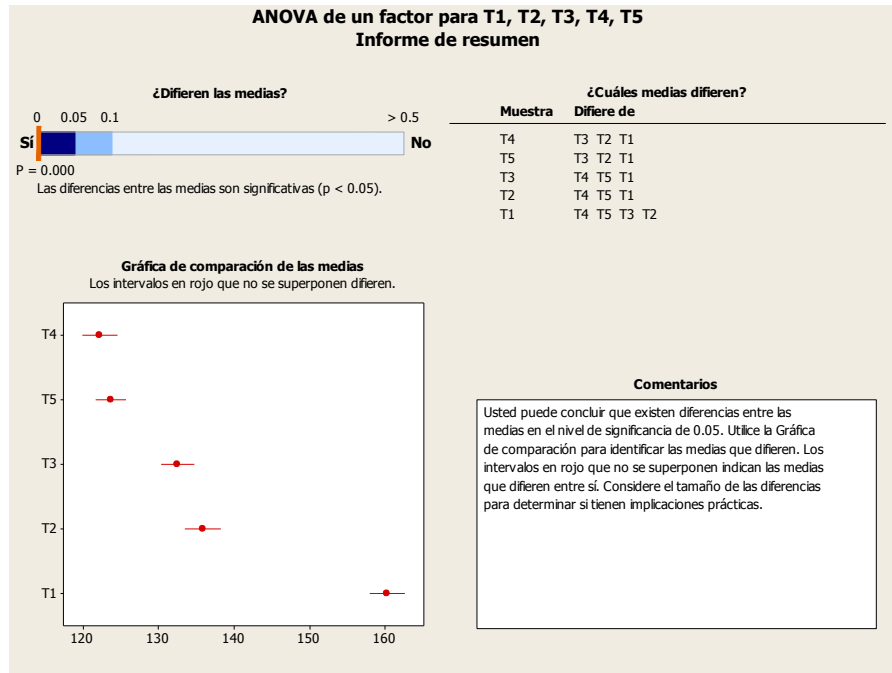


Figura 12. ANOVA de un factor para 0% de vida remanente.

ANOVA de un factor para T1, T2, T3, T4, T5
Tarjeta de informe

Verificar	Estado	Descripción
Datos poco comunes	<input checked="" type="checkbox"/>	No hay puntos de datos poco comunes. Los datos poco comunes pueden tener una fuerte influencia sobre los resultados.
Tamaño de la muestra	<input checked="" type="checkbox"/>	La muestra es suficiente para detectar diferencias entre las medias.
Normalidad	<input checked="" type="checkbox"/>	Debido a que todas sus muestras tienen un tamaño de por lo menos 15, la normalidad no es un problema. La prueba es exacta con datos no normales cuando los tamaños de las muestras son suficientemente grandes.

Figura 13. Tarjeta de informe de ANOVA de un factor.

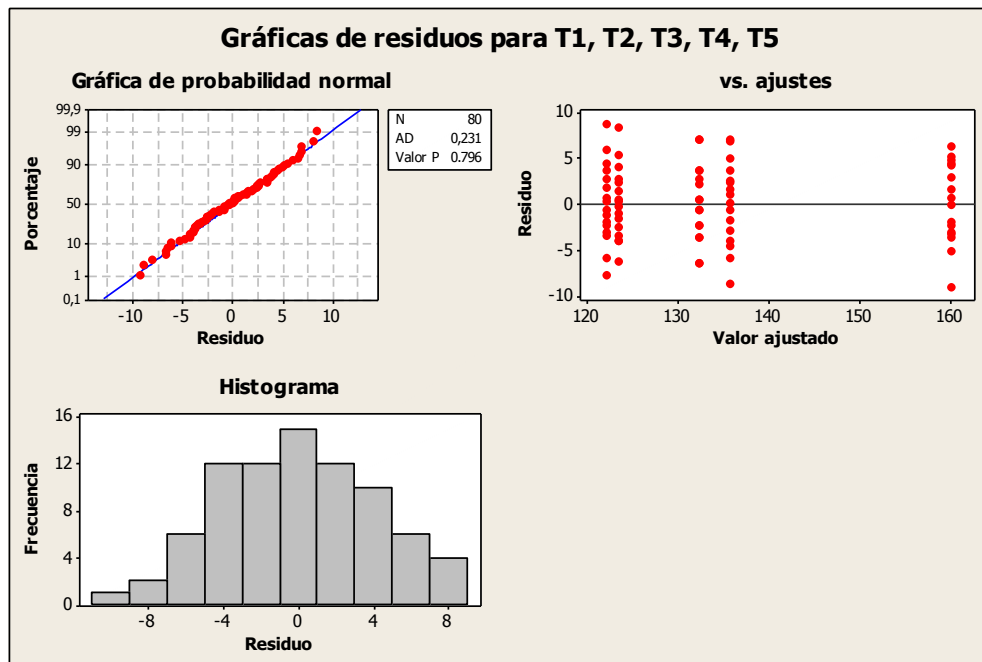


Figura 14. Gráficas de residuos para T1, T2, T3, T4 y T5 con 0% de vida remanente.

Por lo tanto se concluye que no se detectaron diferencias significativas entre T2 y T3, ni T4 y T5 por lo que se decidió realizar una reagrupación de categorías. Así se realizó un ANOVA con los nuevos grupos para comprobar su comportamiento.

Los flujos vehiculares se agrupan en tres nuevos intervalos, T1, T2-T3 y T4-T5, y se realizan nuevamente los análisis estadísticos.

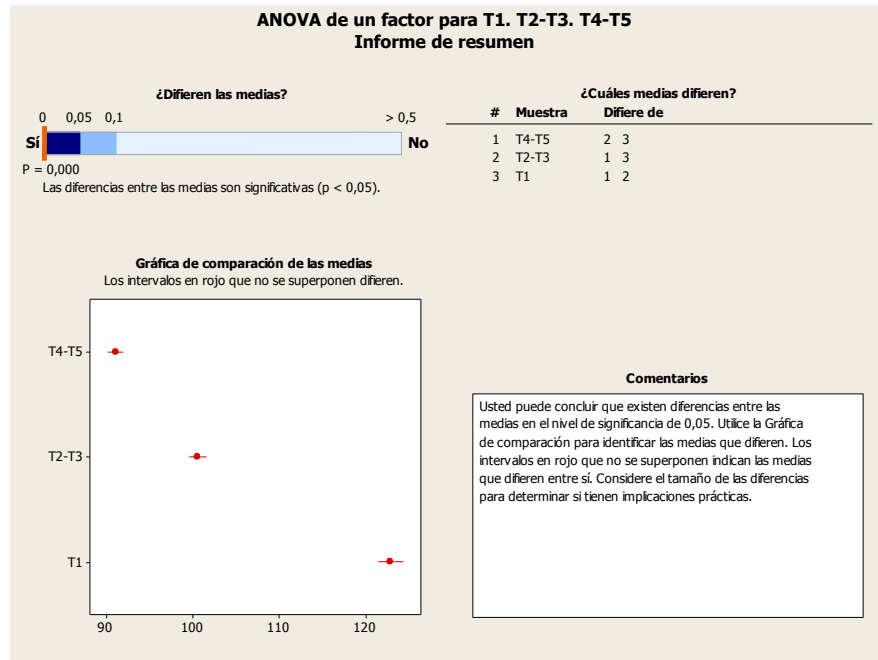


Figura 15. ANOVA de un factor para rangos reagrupados con 0% de vida remanente.

ANOVA de un factor para T1. T2-T3. T4-T5
Tarjeta de informe

Verificar	Estado	Descripción
Datos poco comunes	<input checked="" type="checkbox"/>	No hay puntos de datos poco comunes. Los datos poco comunes pueden tener una fuerte influencia sobre los resultados.
Tamaño de la muestra	<input checked="" type="checkbox"/>	La muestra es suficiente para detectar diferencias entre las medias. Debido a que usted ingresó una diferencia de interés, el Informe de potencia provee una evaluación del tamaño de la muestra para esta diferencia. No tiene que preocuparse por el hecho de que la potencia sea baja porque la prueba detectó una diferencia.
Normalidad	<input checked="" type="checkbox"/>	Debido a que todas sus muestras tienen un tamaño de por lo menos 15, la normalidad no es un problema. La prueba es exacta con datos no normales cuando los tamaños de las muestras son suficientemente grandes.

Figura 16. Tarjeta de informe de ANOVA de un factor.

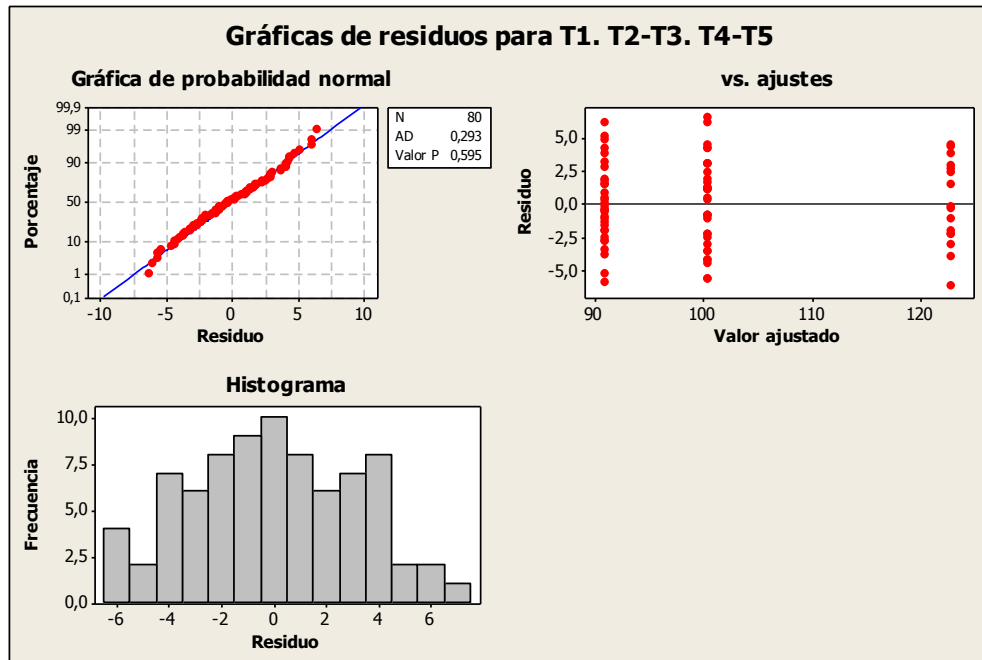


Figura 17. Gráficas de residuos para T1, T2-T3 y T4-T5 con 0% de vida remanente.

En el ANOVA de la figura 15 se observa que el intervalo 1 es significativamente diferente del 2 (T2-T3) y del 3 (T4-T5), el rango 2 es diferente del rango 1 y 3 (T4-T5); y que el rango 3 difiere del rango 1 y 2 (T2-T3). De esta forma, se demuestra estadísticamente que los tres rangos presentan comportamientos diferentes por lo que deben considerarse como tres rangos de clasificación de deflectometría.

3 ANÁLISIS DE RESULTADOS, HALLAZGOS Y OBSERVACIONES

A partir de la metodología descrita anteriormente y de los resultados obtenidos fue posible determinar los intervalos típicos de deflexiones según el grado de deterioro de la estructura del pavimento flexible.

Los resultados se dividen según el flujo vehicular ya que las vías cantonales difieren entre sí en términos de TPD y porcentaje vehículos pesados, que determinan el paquete estructural y con esto la respuesta ante las cargas.

3.1 Clasificación por deflectometría para la RVC

Tres divisiones o segmentos se según el flujo vehicular, de 0 - 1000, de 1000 - 7000 y de 7000 - 15000 vehículos. Para cada uno de estos rangos de TPD se obtuvieron los intervalos de deflexión características para una condición estructural buena, regular, deficiente y muy deficiente.

En la figura 18 se presenta la clasificación de la FWD que se propone utilizar para evaluar la red vial cantonal asfaltada del país, desde el punto de vista estructural.

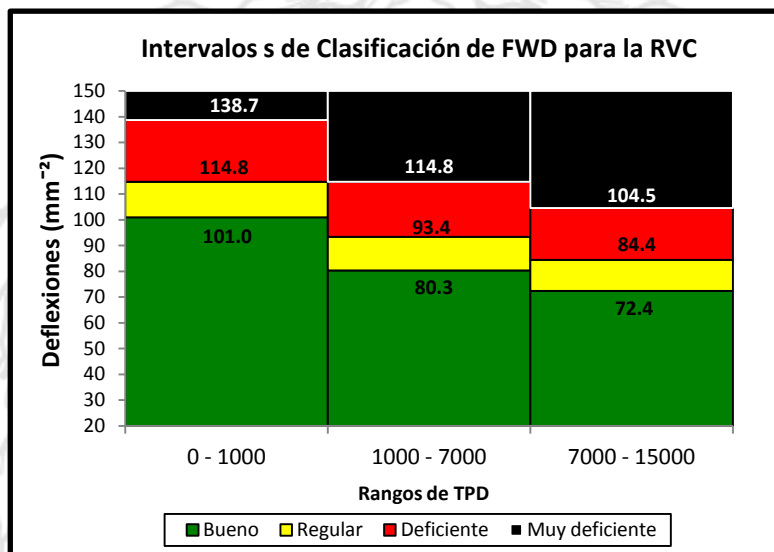


Figura 18. Intervalos de clasificación de FWD para la red vial cantonal.

3.2 Comparación de los intervalos de clasificación por deflectometría para la RVN y la RVC

La red vial nacional cuenta con sus propios intervalos de clasificación por deflectometría, obtenidos mediante un estudio similar al presentado en este informe, pero enfocado a las características de la RVN. Con el presente estudio se obtuvo una clasificación congruente con los requisitos de la red vial cantonal costarricense y las características propias de flujo vehicular y materiales, con el fin que de la clasificación utilizada represente las condiciones observadas en campo.

En la figura 19 se comparan las dos clasificaciones de la condición estructural según las deflexiones que experimenta la estructura. Una de las principales diferencias son los intervalos de flujo vehicular, en la clasificación de la RVN existen más intervalos de TPD, que contemplan flujos de hasta 40000 vehículos; para la red vial cantonal son sólo necesarios tres intervalos, con un máximo de 15000 vehículos. Además, el primer intervalo contempla flujos vehiculares mucho más bajos; que en el caso de la red vial cantonal permite abarcar una gran cantidad de rutas, principalmente en zonas rurales.

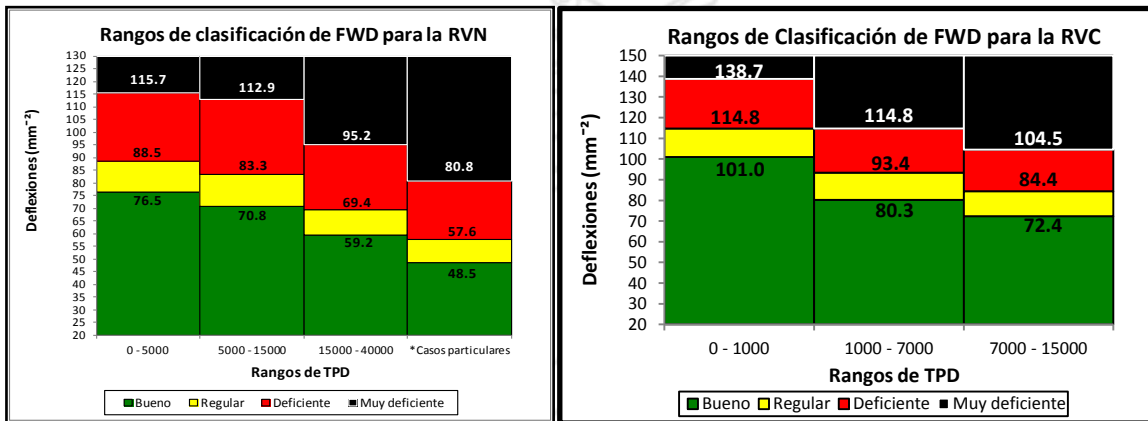


Figura 19. Comparación de rangos de clasificación de FWD para RVN y RVC, respectivamente.

4 CONCLUSIONES

- A través del análisis inicial de la base de datos de suelo se determinó que más del 75% de las subrasantes analizadas poseían un CBR en sitio de al menos un 2,9%, según los resultados del retrocálculo de módulo esto corresponde a una subrasante con una rigidez de 21 MPa.
- El análisis de retrocálculo de módulos en las rutas seleccionadas indicó que se tienen materiales de base con un alto módulo a pesar de ser un material con cierto grado de deterioro, sin embargo este valor para análisis se asumió como mínimo, partiendo del hecho que el módulo de los materiales granulares disminuye con el tiempo en operación.



- Se evidenció que los materiales de subbase analizados en las rutas seleccionadas poseían un módulo inferior al mínimo, según la especificación nacional, esto evidencia que este material es el que más se ha deteriorado por estar en contacto directo con la subrasante (por contaminación), o que desde el inicio era un material que no cumplía con la especificación de subbase.
- El análisis de las deflexiones evidenció que no es necesario mantener 5 categorías de flujo vehicular para tránsitos menores de 15000 vehículos, dado que la combinación de tránsitos y porcentaje de vehículos pesados en las categorías T2 y T3, además de T4 y T5 brinda resultados muy similares.
- El análisis de los datos analizados utilizando estadística descriptiva, pruebas de normalidad, ANOVA de un factor así como la interpretación de los diferentes percentiles, resultó ser una herramienta indispensable para seleccionar las propiedades más representativas de la muestra analizada.
- Los nuevos valores determinados son coherentes con los resultados del Proyecto N° UI-PC-04-08, dándose un cambio significativo en la forma de clasificar los flujos vehiculares, un leve cambio en las categorías de alto flujo vehicular y un cambio significativo en las deflexiones de la categoría baja.

5 RECOMENDACIONES

- Realizar una validación de los resultados obtenidos a través de la aplicación de estos resultados y compararlos con resultados de campo.
- Realizar una revisión de los diseños obtenido por deformación permanente y fatiga con las ecuaciones calibradas para Costa Rica en el futuro.



6 INVESTIGACIÓN SUGERIDA

- Estudiar con mayor nivel de detalle la relación que existe entre el módulo retrocalculado vs módulo de laboratorio, CBR en sitio y de laboratorio.
- Realizar una investigación sobre los parámetros para clasificar el IRI en la red vial cantonal, considerando particularidades de este tipo de rutas en comparación con proyectos en la red vial nacional.

7 REFERENCIAS

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

American Association of State Highway and Transportation Officials. (2008). *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide*. Washington DC: AASHTO.

Barrantes, R., Loría, L. G., Sibaja, D., & Porras, J. D. (2008a). *Proyecto N° UI-PC-04-08: Desarrollo de herramientas de gestión con base en la determinación de índices de red vial nacional*. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LanammeUCR), San José, Costa Rica.

Juárez, E., & Rico, A. (2001). *Mecánica de suelos Tomo 1: Fundamentos de la Mecánica de Suelos*. Mexico, D.F: Limusa.

Ministerio de Obras Públicas y Transportes. (2010). *Manual de especificaciones generales para la construcción de carreteras, caminos y puentes*. San José, Costa Rica.

Montgomery, D., & Runger, G. (2006). *Probabilidad y Estadísticas aplicadas a la Ingeniería*. México D.F: Limusa.

Porras, J. (2009). *Determinación de Rangos de Módulos Resilientes para Materiales Constituyentes de la Estructura de Pavimentos Existentes en Costa Rica, Mediante el Procedimiento de retrocálculo de Módulos y Ensayos Dinámicos*. Tesis para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Civil, San José, Costa Rica.



Ulloa, Á., Allen, J., Badilla, G., & Sibaja, D. (2007). *Proyecto N° PI-01-PIIVI-2007: Encuesta de Carga*. Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales, Programa de Investigación en Infraestructura Vial, San José, Costa Rica.



ANEXOS

A. Retrocálculo de módulos resilientes.

La figura a.1 presenta el resultado de uno de los retrocálculos, asociado al tramo homogéneo número 25 de la localidad de Grecia, donde se realizó el sondeo 10 que presenta un CBR de 2,8%. Las coordenadas del sondeo son latitud: 10,076996 y longitud: -84,309519. Se presenta la variación del módulo de la base granular (E_1), la subbase granular (E_2) y la subrasante (E_{sub}).

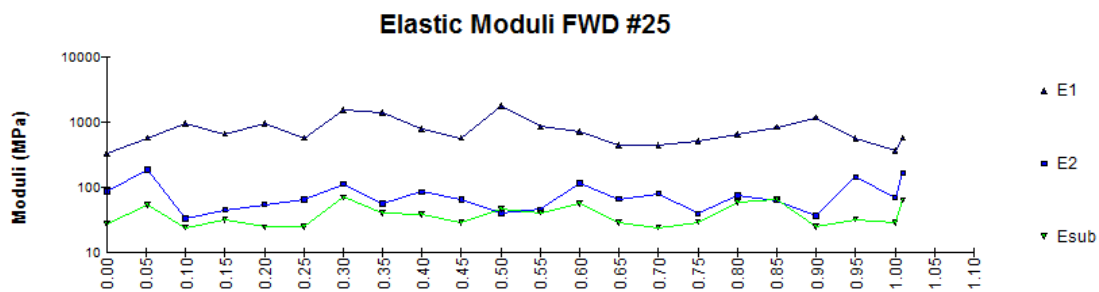


Figura a.1. Módulo elástico de la base, subbase y subrasante del TH 25 de Grecia.

Similar al caso anterior, en la figura a.2 se presenta la variación del módulo resiliente, obtenido por retrocálculo, de la base granular (E_1), la subbase granular (E_2) y la subrasante (E_{sub}), asociado al tramo homogéneo número 5 de la localidad de Paraíso. En este tramo se realizó el sondeo 5 que presenta un CBR de 2,76%. Las coordenadas del sondeo son latitud: 9,838554 y longitud: -83,862622.

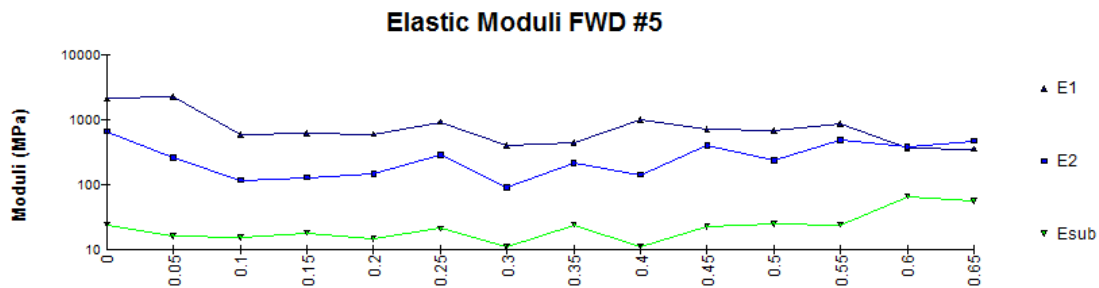


Figura a.2. Módulo elástico de la base, subbase y subrasante del TH 5 de Paraíso.

B. Ejemplo de cálculo de espesores de la estructura del pavimento con AASHTO-93.

Tabla b.1. Valores de módulo resiliente para el escenario 4.

Material	Módulo para diseño (psi)
Base granular	44000
Subbase granular	15000
Subrasante	2915
Carpeta	450000

$$\log_{10} W_{18} = Z_r * S_o + 9.36 * \log_{10}(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log_{10} \left(\frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5} \right)}{\frac{0.40 + 1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + 2.32 * \log_{10} * M_r - 8.07$$

Ejemplo de cálculo de espesores para los flujos vehiculares T1 y T5, para el escenario urbano y un periodo de diseño de 12 años.

Tabla b.2. Variables utilizadas para calcular el SN requerido total para el flujo vehicular T1.

Variables	Valor
Desviación estándar (S_o)	0,35
Confiabilidad	80%
Z de la distribución normal estándar	-0,8416
Módulo de resiliencia del material (M_r)	2915
Ejes equivalentes (W_{18})	390769
Serviciabilidad inicial (P_o)	4,2
Serviciabilidad final (P_t)	1,5
Pérdida de serviciabilidad (ΔPSI)	2,7
$\log_{10}(W_{18})$ requerido	5,9
Número estructural (SN)	3,51

Tabla b.3. Cálculo de espesores con la metodología AASHTO-93 para el flujo vehicular T1 urbano.

Rango de flujo vehicular	T1
Escenario	Urbano
ESALS	3,91 x 10⁵

SN requerido total	3,51
SN ₁ requerido sobre BG	1,30
SN ₂ requerido sobre SB	2,00

m= 0,9

	SN _i	SN requerido	Espesor (pulgadas)	Espesor (cm)	Espesor redondeado (cm)	Espesor redondeado (pulgadas)	SN real	SN faltante
Carpeta asfáltica CA	1,30	1,30	2,89	7,3	8	3,15	1,42	2,09
Base granular BG	2,00	0,58	3,62	9,2	15	5,91	0,95	1,14
Subbase granular SB	3,51	1,14	11,58	29,4	30	11,81	1,16	-0,02

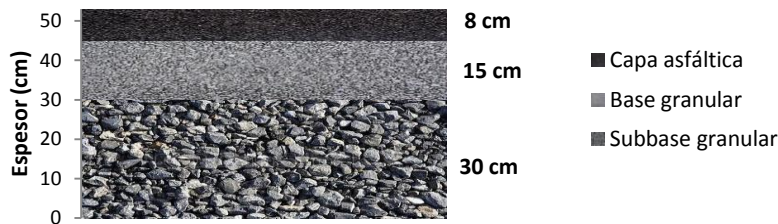


Figura b.1. Diagrama de la estructura del pavimento requerida para el flujo vehicular T1 urbano.

Tabla b.4. Variables utilizadas para calcular el SN requerido total para el flujo vehicular T5.

Variables	Valor
Desviación estándar (S_o)	0,35
Confiabilidad	80%
Z de la distribución normal estándar	-0,8416
Módulo de resiliencia del material (M_r)	2915
Ejes equivalentes (W_{18})	4585553
Serviciabilidad inicial (P_o)	4,2
Serviciabilidad final (P_t)	1,5
Pérdida de serviciabilidad (ΔPSI)	2,7
Log₁₀(W_{18}) requerido	6,66
Número estructural (SN)	4,86

Tabla b.5. Cálculo de espesores con la metodología AASHTO-93 para el flujo vehicular T5 urbano.

Símbolo	T5
Escenario	Urbano
ESALS	4,59 x 10⁶
SN requerido total	4,86
SN1 requerido sobre BG	1,99
SN2 requerido sobre SB	2,90

m= 0,9

	SN _i	SN requerido	Espesor (pulgadas)	Espesor (cm)	Espesor redondeado (cm)	Espesor redondeado (pulgadas)	SN real	SN faltante
Carpeta asfáltica CA	1,99	1,99	4,42	11,24	12	4,72	2,13	2,73
Base granular BG	2,90	0,78	4,83	12,27	15	5,91	0,95	1,78
Subbase granular SB	4,86	1,78	18,17	46,15	47	18,50	1,81	-0,03

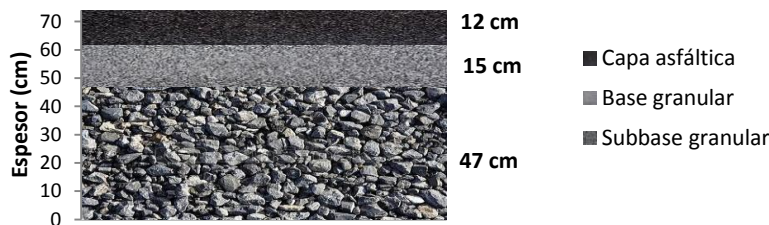


Figura b.2. Diagrama de la estructura del pavimento requerida para el flujo vehicular T5 urbano.

Ejemplo de cálculo de espesores para los flujos vehiculares T1 y T5, para el escenario rural y un periodo de diseño de 12 años.

Tabla b.6. Variables utilizadas para calcular el SN requerido total para el flujo vehicular T1.

Variables	Valor
Desviación estándar (S_o)	0,35
Confiabilidad	80%
Z de la distribución normal estándar	-0,8416
Módulo de resiliencia del material (M_r)	2915
Ejes equivalentes (W_{18})	340261
Serviciabilidad inicial (P_o)	4,2
Serviciabilidad final (P_t)	1,5
Pérdida de serviciabilidad (ΔPSI)	2,7
$\text{Log}_{10}(W_{18})$ requerido	5,53
Número estructural (SN)	3,44

Tabla b.7. Cálculo de espesores con la metodología AASHTO-93 para el flujo vehicular T1.

Símbolo	T1
Escenario	Rural
ESALS	$3,40 \times 10^5$

SN requerido total	3,44
SN1 requerido sobre BG	1,27
SN2 requerido sobre SB	1,96

$m = 0,9$

	SN_i	SN requerido	Espesor (pulgadas)	Espesor (cm)	Espesor redondeado (cm)	Espesor redondeado (pulgadas)	SN real	SN faltante
Carpeta asfáltica CA	1,27	1,27	2,81	7,14	8	3,15	1,42	2,02
Base granular BG	1,96	0,54	3,35	8,51	15	5,91	0,95	1,07
Subbase granular SB	3,44	1,07	10,90	27,68	28	11,02	1,08	-0,01

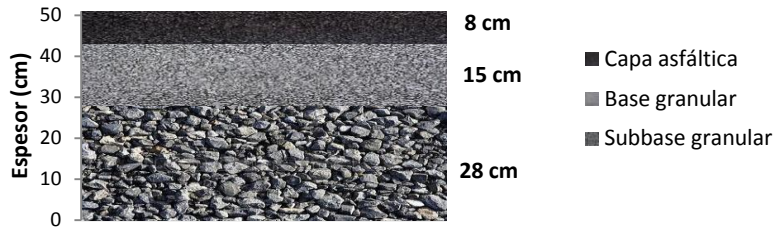


Figura b.3. Diagrama de la estructura del pavimento requerida para el flujo vehicular T1 rural.

Tabla b.8. Variables utilizadas para calcular el SN requerido total para el flujo vehicular T5.

Variables	Valor
Desviación estándar (S_o)	0,35
Confiabilidad	80%
Z de la distribución normal estándar	-0,8416
Módulo de resiliencia del material (M_r)	2915
Ejes equivalentes (W_{18})	3455779
Serviciabilidad inicial (P_o)	4,2
Serviciabilidad final (P_t)	1,5
Pérdida de serviciabilidad (ΔPSI)	2,7
$\log_{10}(W_{18})$ requerido	6,54
Número estructural (SN)	4,69

Tabla b.9. Cálculo de espesores con la metodología AASHTO-93 para el flujo vehicular T5 rural.

Símbolo	T5
Escenario	Rural
ESALS	$3,46 \times 10^6$
SN requerido total	4,69
SN1 requerido sobre BG	1,90
SN2 requerido sobre SB	2,79

m= 0,9

	SN _i	SN requerido	Espesor (pulgadas)	Espesor (cm)	Espesor redondeado (cm)	Espesor redondeado (pulgadas)	SN real	SN faltante
Carpeta asfáltica CA	1,90	1,90	4,23	10,73	11	4,33	1,95	2,74
Base granular BG	2,79	0,84	5,21	13,23	15	5,91	0,95	1,78
Subbase granular SB	4,69	1,78	18,20	46,22	47	18,50	1,81	-0,03

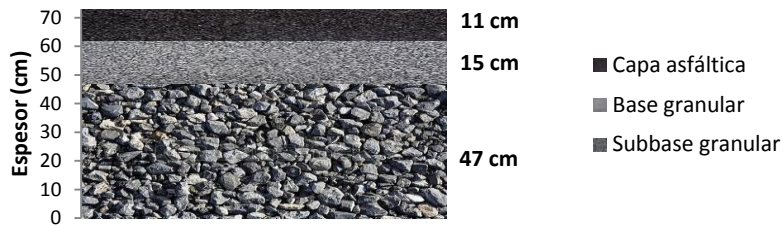


Figura b.4. Diagrama de la estructura del pavimento requerida para el flujo vehicular T5 rural.



C. Ejemplo de reducción de los módulos resilientes de las capas según los SN ajustados para la vida remanente.

Tabla c.1. Factor de condición según la vida remanente.

Vida remanente (%)	CF
100	1,000
60	0,905
20	0,762
0	0,500

Tabla c.2. Diseño con 60% de vida remante para el flujo vehicular T1 urbano a 12 años.

SN ajustado	3.193					
	Espesor (in)	Coeficiente		Módulo (psi)	SN efectivo	% de reducción
Carpeta asfáltica CA	3,15	a1	0,4073	373667	1,283	9,5%
Base granular BG	5,91	a2	0,1622	37595	0,862	9,5%
Subbase granular SB	11,81	a3	0,0986	13506	1,048	9,5%

Tabla c.3. Diseño con 20% de vida remante para el flujo vehicular T1 urbano a 12 años.

SN ajustado	2.688					
	Espesor (in)	Coeficiente		Módulo (psi)	SN efectivo	% de reducción
Carpeta asfáltica CA	3,15	a1	0,3428	265124	1,080	24%
Base granular BG	5,91	a2	0,1365	29645	0,726	24%
Subbase granular SB	11,81	a3	0,0830	11527	0,882	24%

Tabla c.4. Diseño con 0% de vida remante para el flujo vehicular T1 urbano a 12 años.

SN ajustado	1.764					
	Espesor (in)	Coeficiente		Módulo (psi)	SN efectivo	% de reducción
Carpeta asfáltica CA	3,15	a1	0,2250	124393	0,709	50%
Base granular BG	5,91	a2	0,0896	19212	0,476	50%
Subbase granular SB	11,81	a3	0,0545	8631	0,579	50%

D. Número estructural efectivo para las estructuras diseñadas

Tabla D1. Número estructural para 100% de Vida Remanente a 12 años.

	Rango de flujo vehicular	ESALS de diseño	Escenario			
			1	2	3	4
Urbano	T1	3,91E+05	3,54	3,52	3,51	3,53
	T2	1,49E+06	4,22	4,21	4,23	4,23
	T3	2,13E+06	4,43	4,40	4,43	4,42
	T4	5,11E+06	4,95	4,95	4,96	4,93
	T5	4,59E+06	4,87	4,87	4,88	4,89
Rural	T1	3,40E+05	3,47	3,45	3,47	3,45
	T2	1,90E+06	4,35	4,36	4,35	4,35
	T3	2,18E+06	4,43	4,44	4,43	4,42
	T4	3,93E+06	4,78	4,77	4,79	4,79
	T5	3,46E+06	4,71	4,69	4,71	4,72

Tabla D2. Número estructural para 100% de Vida Remanente a 15 años.

	Rango de flujo vehicular	ESALS de diseño	Escenario			
			1	2	3	4
Urbano	T1	5,52E+05	3,71	3,70	3,68	3,68
	T2	2,10E+06	4,43	4,40	4,39	4,42
	T3	3,00E+06	4,63	4,62	4,64	4,64
	T4	7,21E+06	5,15	5,17	5,19	5,19
	T5	6,48E+06	5,10	5,10	5,11	5,09
Rural	T1	4,81E+05	3,62	3,62	3,64	3,64
	T2	2,69E+06	4,55	4,54	4,56	4,56
	T3	3,08E+06	4,63	4,62	4,64	4,64
	T4	5,55E+06	4,99	4,99	4,99	5,01
	T5	4,88E+06	4,91	4,91	4,92	4,93

Tabla D3. SN ajustados a 60% de vida remanente con un periodo de diseño de 12 años.

	Rango de flujo vehicular	ESALS de diseño	Escenario			
			1	2	3	4
Urbano	T1	3,91E+05	3,21	3,19	3,18	3,33
	T2	1,49E+06	3,82	3,81	3,83	4,00
	T3	2,13E+06	4,01	3,98	4,01	4,20
	T4	5,11E+06	4,48	4,48	4,49	4,69
	T5	4,59E+06	4,41	4,41	4,42	4,60
Rural	T1	3,40E+05	3,14	3,12	3,14	3,30
	T2	1,90E+06	3,94	3,95	3,94	4,13
	T3	2,18E+06	4,01	4,02	4,01	4,20
	T4	3,93E+06	4,33	4,32	4,34	4,53
	T5	3,46E+06	4,26	4,25	4,27	4,46

Tabla D4. SN ajustados a 20% de vida remanente con un periodo de diseño de 12 años.

	Rango de flujo vehicular	ESALS de diseño	Escenario			
			1	2	3	4
Urbano	T1	3,91E+05	2,70	2,68	2,67	2,69
	T2	1,49E+06	3,22	3,21	3,22	3,22
	T3	2,13E+06	3,37	3,35	3,38	3,37
	T4	5,11E+06	3,77	3,77	3,77	3,76
	T5	4,59E+06	3,71	3,71	3,72	3,73
Rural	T1	3,40E+05	2,64	2,62	2,64	2,63
	T2	1,90E+06	3,31	3,32	3,32	3,31
	T3	2,18E+06	3,37	3,38	3,38	3,37
	T4	3,93E+06	3,64	3,63	3,65	3,65
	T5	3,46E+06	3,59	3,58	3,59	3,59

Tabla D5. SN ajustados a 0% de vida remanente con un periodo de diseño de 12 años.

	Rango de flujo vehicular	ESALS de diseño	Escenario			
			1	2	3	4
Urbano	T1	3,91E+05	1,77	1,76	1,76	1,76
	T2	1,49E+06	2,11	2,10	2,11	2,12
	T3	2,13E+06	2,21	2,20	2,22	2,21
	T4	5,11E+06	2,47	2,47	2,48	2,47
	T5	4,59E+06	2,44	2,44	2,44	2,45
Rural	T1	3,40E+05	1,73	1,72	1,74	1,73
	T2	1,90E+06	2,17	2,18	2,18	2,17
	T3	2,18E+06	2,21	2,22	2,22	2,21
	T4	3,93E+06	2,39	2,39	2,40	2,40
	T5	3,46E+06	2,35	2,35	2,36	2,36

Tabla D6. SN ajustados a 60% de vida remanente con un periodo de diseño de 15 años.

	Rango de flujo vehicular	ESALS de diseño	Escenario			
			1	2	3	4
Urbano	T1	5,52E+05	3,36	3,35	3,33	3,33
	T2	2,10E+06	4,01	3,98	3,98	4,00
	T3	3,00E+06	4,19	4,18	4,20	4,20
	T4	7,21E+06	4,66	4,67	4,69	4,69
	T5	6,48E+06	4,62	4,62	4,62	4,60
Rural	T1	4,81E+05	3,28	3,28	3,29	3,30
	T2	2,69E+06	4,12	4,11	4,13	4,13
	T3	3,08E+06	4,19	4,18	4,20	4,20
	T4	5,55E+06	4,51	4,51	4,52	4,53
	T5	4,88E+06	4,44	4,44	4,45	4,46

Tabla D7. SN ajustados a 20% de vida remanente con un periodo de diseño de 15 años.

	Rango de flujo vehicular	ESALS de diseño	Escenario			
			1	2	3	4
Urbano	T1	5,52E+05	2,82	2,82	2,80	2,81
	T2	2,10E+06	3,37	3,35	3,35	3,37
	T3	3,00E+06	3,53	3,52	3,53	3,53
	T4	7,21E+06	3,93	3,93	3,95	3,95
	T5	6,48E+06	3,89	3,89	3,89	3,87
Rural	T1	4,81E+05	2,76	2,76	2,77	2,78
	T2	2,69E+06	3,47	3,46	3,47	3,47
	T3	3,08E+06	3,53	3,52	3,53	3,53
	T4	5,55E+06	3,80	3,80	3,80	3,82
	T5	4,88E+06	3,74	3,74	3,75	3,76

Tabla D8. SN ajustados a 0% de vida remanente con un periodo de diseño de 15 años.

	Rango de flujo vehicular	ESALS de diseño	Escenario			
			1	2	3	4
Urbano	T1	5,52E+05	1,85	1,85	1,84	1,84
	T2	2,10E+06	2,21	2,20	2,20	2,21
	T3	3,00E+06	2,31	2,31	2,32	2,32
	T4	7,21E+06	2,58	2,58	2,59	2,59
	T5	6,48E+06	2,55	2,55	2,55	2,54
Rural	T1	4,81E+05	1,81	1,81	1,82	1,82
	T2	2,69E+06	2,28	2,27	2,28	2,28
	T3	3,08E+06	2,31	2,31	2,32	2,32
	T4	5,55E+06	2,49	2,49	2,50	2,50
	T5	4,88E+06	2,46	2,46	2,46	2,47