



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

**Análisis por Confiabilidad del Modelo de Diseño AASHTO-
93 para Pavimentos Flexibles en el Valle de Aburra.**

Autor

Mario Santiago Hernández Arango

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental

Medellín, Colombia

2019



Análisis por Confiabilidad del Modelo de Diseño AASHTO-93 para Pavimentos Flexibles
en el Valle de Aburra.

Mario Santiago Hernández Arango

Tesis como requisito para optar al título de:
Magister en Ingeniería.

Asesores (a) o Director(a) o Co- Directores(a).

DIRECTOR: PhD Juan Pablo Osorio Salas
CODIRECTOR: PhD Juan Camilo Viviescas Restrepo

Universidad de Antioquia
Escuela Ambiental, Facultad de Ingeniería
Medellín, Colombia
2019

Este proyecto, y el esfuerzo de cada persona que directa e indirectamente participaron en su elaboración durante los últimos dos años, son un sentido homenaje para nuestra Madre Luz María Rodríguez Rivera. Como diría el maestro y poeta Wilfran Castillo: “Que no querías marcharte sin avisarnos nada. Que un ángel te abrazaba y no pudiste soltarte...” Y nosotros no fuimos capaces de alcanzarte. Dejaste heridas abiertas y profundas en el corazón. Heridas que nunca cerrarán. Heridas que nunca sanarán...

AGRADECIMIENTOS

A mi esposa, Carolina... Dijeron que sería imposible; imposible hubiera sido si tu no estuvieras a mi lado. No he sentido amor más grande que el amor de aquella que es capaz de dejar sus sueños por los sueños de los demás. Ese es el amor que tú me has dado en estos años. Ya es hora que vuelvas a volar de nuevo por tus sueños.

A mi hijo y mi hija, Samuel y Valentina... Que me alcance la vida para compensar la ausencia que trajo este camino que hoy termina. Ustedes son mi triunfo, mi amor eterno, mi aliento de vida. Ustedes son mi verdadera Maestría.

A mi mamá y mi papá, Lucena y Omar Federico... Espero estar haciendo todo cómo ustedes lo soñaron. Espero que siempre mis acciones sean motivo de orgullo para sus corazones.

A mis hermanos, Alejandro y Pablo... El éxito corre por nuestras venas. Simplemente nacimos para triunfar. Que nuestra medida del éxito sea todo aquello que enorgullezca a mi mamá y a mi papá.

A mis tíos, Nelson y Gladys... Siempre tendiéndonos la mano en el momento en que más los necesitamos. Ustedes son nuestra verdadera familia.

A don Edelberto, a Sara, a Matías, a Johanna y a Adalberto... Sus buenos deseos se materializan en este nuevo logro. Que todos nuestros éxitos fortalezcan nuestra familia.

A mis directores de Maestría y grandísimos amigos de la vida, los Doctores Juan Camilo Viviescas Restrepo y Juan Pablo Osorio Salas... Gracias, de corazón, por creer en mis capacidades, por la paciencia que me tuvieron en este proceso, por brindarme la oportunidad de enseñar. Este es nuestro logro.

A mi “jefe eterno”, el Doctor Luis Fernando Marín Clavijo... Inge, usted impulsó esta Maestría, y lo más importante, usted confió en mí sin conocerme. Graduarme era una deuda personal que tenía con usted y ya se la cumplí. Muchas gracias por todo.

A mis profesores, John Jairo Agudelo Ospina y Rodrigo Iván Osorio... Gracias a sus enseñanzas he podido consolidar un nombre en el mundo de la Ingeniería. Soy su creación

A los Doctores Giovanni Arrieta Fontecha y Obed Franco Bermúdez... Gracias por permitirme ingresar al mundo de la Ingeniería Civil, gracias por valorar mi esfuerzo y mi trabajo.

A mis estudiantes de la Universidad de Antioquia, de la Universidad de Medellín y de la Universidad EAFIT... Me obligan a ser cada vez mejor.

Fin del capítulo... Que comience el siguiente...

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	13
ABSTRACT	14
1 INTRODUCCIÓN.....	15
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	15
1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO	17
1.3 METODOLOGÍA.....	17
2 MARCO DE REFERENCIA	19
2.1 VARIABLES FUNDAMENTALES DE DISEÑO.....	19
2.1.1 Módulo Resiliente	19
2.1.2 Carga de diseño (tránsito).....	21
2.2 MÉTODOS DE DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES.....	22
2.2.1 Método AASHTO-93	23
2.2.2 Metodología INVIAS 1998.	24
2.2.3 Método de diseño analíticos, mecanistas o racionales	28
2.2.4 Guía de diseño mecánico empírico de pavimentos (MEPDG).....	31
2.3 ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD EN PAVIMENTOS.....	32
2.4 FUNCIÓN DE PROBABILIDAD DEL MÓDULO RESILIENTE DE LA SUBRASANTE	35
2.4.1 Determinación de la función de probabilidad.	36
2.4.2 Coeficiente de Variación.	41
2.5 MÉTODO MONTE CARLO	46
2.6 INVESTIGACIONES PREVIAS.....	47
2.7 DISCUSIONES Y CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO.....	51
3 ZONA DE ESTUDIO Y VARIABLES DE DISEÑOS	52
3.1 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	52
3.2 REGIÓN CLIMÁTICA.	55
3.3 RESISTENCIA DE LA SUBRASANTE.....	58
3.4 RANGO DE TRÁNSITO.....	59
3.5 COEFICIENTES ESTRUCTURALES Y DE DRENAJE	60
3.6 ESPESORES DE DISEÑO.....	61
3.7 FUNCIONES DE DENSIDAD.....	61
3.7.1 Metodología de diseño	62

3.7.2	Cálculo de funciones.....	63
3.8	DISCUSIONES Y CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO.....	67
4	MODELACIÓN Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	69
4.1	FACTOR DE SEGURIDAD DETERMINISTICO.....	72
4.2	CALIBRACIÓN DEL MÉTODO MONTE CARLO.....	74
4.2.1	Región 2.....	74
4.2.2	Región 4.....	76
4.3	FUNCIÓN DE DENSIDAD DE FALLA.....	78
4.4	CONFIABILIDAD ESTABLECIDA POR LA METODOLOGÍA INVIAS 1998.....	78
4.5	CONFIABILIDAD DE LAS ESTRUCTURAS.....	82
4.6	DISCUSIONES Y CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO.....	88
5	CONCLUSIONES FINALES E INVESTIGACIONES FUTURAS.....	90
5.1	CONCLUSIONES FINALES POR CAPÍTULO.....	90
5.1.1	Marco de referencia.....	90
5.1.2	Zona de estudio y variables de diseño.....	90
5.1.3	Modelación y análisis estadístico.....	90
5.2	CONCLUSIÓN FINAL.....	92
5.3	INVESTIGACIONES FUTURAS.....	92
6	BIBLIOGRAFÍA.....	94
7	ANEXO 1: FUNCIONES DE DENSIDAD DEL MÓDULO RESILIENTE.....	97
7.1	FUNCIONES DE DENSIDAD DE CADA ENTORNO DE SUBRASANTE.....	97
7.2	RELACIONES ESTADÍSTICAS.....	101
7.3	COMPARACIÓN DE FUNCIONES DE DENSIDAD.....	104
8	ANEXO 2: FUNCIONES DE DENSIDAD DE FALLA.....	107
8.1	FUNCIÓN DE AJUSTE.....	107
8.2	CONFIABILIDAD DEL MÉTODO INVIAS 1998.....	111
8.3	ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD.....	114

TABLA DE FIGURAS

Figura 2-1. Estado de esfuerzos durante la ejecución del ensayo de módulo resiliente. (tomado de Rondon y Reyes (2015, p. 355)).	20
Figura 2-2. Diagrama de flujo de la MEPDG (tomado de Quiroga & Quiroz, 2012).	31
Figura 2-3. Concepto de confiabilidad en el diseño de pavimentos (figura modificada de Luo et al., 2014).	34
Figura 2-4. Ejecución del modelo de simulación (Rodríguez et al., 2016).	34
Figura 2-5. Ejemplo de función de distribución al histograma de frecuencias (tomado de Baecher & Christian, 2003).	35
Figura 2-6. Diagrama de flujo representativo de la aplicación del método de Monte Carlo para el cálculo de los parámetros estadísticos de la capacidad portante ultima (Figura modificada a partir de (figura adaptado de Crespo, 2002)).	46
Figura 2-7. Factor de seguridad para diferentes niveles de confiabilidad de fatiga y deformación y covarianza de los factores de daño (tomado de Kalita y Rajbongshi, 2015).	48
Figura 2-8. Procedimiento de análisis de confiabilidad para pavimentos flexibles (tomado de Thyagarajan et al., 2011).	49
Figura 2-9. Propagación de la incertidumbre en el MEPDG (figura adaptada de Luo et al., 2014).	50
Figura 2-10. Modelo conceptual para el desarrollo del modelo de simulación (tomado de Rodríguez et al., 2016).	50
Figura 3-1. Localización del Valle de Aburrá.	52
Figura 3-2. Temperatura y precipitación anuales promedio de los municipios del Valle de Aburrá (Fuente: CLIMATE-DATA.ORG (2018). Fecha de consulta: 21 de febrero de 2018).	53
Figura 3-3. Temperatura anual y altura promedio de los municipios del Valle de Aburrá (Fuente: CLIMATE-DATA.ORG (2018). Fecha de consulta: 21 de febrero de 2018).	54
Figura 3-4. Precipitación anual y altura promedio de los municipios del Valle de Aburrá (Fuente: CLIMATE-DATA.ORG. Fecha de consulta: 21 de febrero de 2018).	54
Figura 3-5. Regiones climáticas en Colombia y Antioquia (elaboración propia).	55
Figura 3-6. Regiones climáticas en Antioquia y el Valle de Aburrá (elaboración propia).	56
Figura 3-7. Regiones climáticas en el Valle de Aburrá (elaboración propia).	57
Figura 3-8. Regiones climáticas y municipios del Valle de Aburrá (elaboración propia).	57
Figura 3-9. Correlaciones del valor del CBR y el módulo resiliente de una subrasante (elaboración propia).	59
Figura 3-10. Variación del número estructural respecto la carga de diseño de un pavimento flexible diseñado con los parámetros de la <i>metodología INVIAS 1998</i> (elaboración propia).	60
Figura 3-11. Relación del coeficiente de variación (CV) con los coeficientes de asimetría y curtosis de las funciones de densidad del módulo resiliente (M_r), para todos los entornos de subrasante del proyecto.	64
Figura 3-12. Funciones de densidad del módulo resiliente para el suelo tipo S1. (Convenciones de funciones: CV=10% - línea roja, CV=30% - línea azul, CV=50% - línea morada, CV=70% - línea negra).	65
Figura 3-13. Comparación de la relación entre el coeficiente de variación (CV) con la probabilidad que el módulo resiliente (M_r) sea menor al rango mínimo (RM), establecido en la <i>metodología INVIAS 1998</i> , para las funciones de densidad normal y log-normal de todos los entornos de suelos definidos en el proyecto.	66

Figura 4-1. Diagrama de flujo con la secuencia de las variables para la selección de la estructura de pavimento.	69
Figura 4-2. Proceso de cálculo de la función de densidad de falla de la estructura de pavimento.	70
Figura 4-3. Metodología de cálculo de la función de densidad de falla de un pavimento obtenido por la <i>metodología INVIAS 1998</i>	71
Figura 4-4. Factor de seguridad determinístico de las estructuras de pavimento de la región R2.	73
Figura 4-5. Factor de seguridad determinístico de las estructuras de pavimento de la región R4.	73
Figura 4-6. Calibración entorno de subrasante S1, región R2.	74
Figura 4-7. Calibración entorno de subrasante S2, región R2.	75
Figura 4-8. Calibración entorno de subrasante S3, región R2.	75
Figura 4-9. Calibración entorno de subrasante S1, región R4.	76
Figura 4-10. Calibración entorno de subrasante S2, región R4.	77
Figura 4-11. Calibración entorno de subrasante S3, región R4.	77
Figura 4-12. Función de densidad de falla R4-S1-T2-N-30%. Cálculo de la carga de diseño asociada a una confiabilidad del 90% (<i>metodología INVIAS 1998</i>) para una estructura de pavimento con el suelo más desfavorable (S1), el rango de tránsito menor (T2) y una función de densidad del módulo resiliente normal con un coeficiente de variación del módulo del 30%, en la región R4.	79
Figura 4-13. Carga de diseño asociada a una confiabilidad del 90%, en las estructuras de pavimento de la <i>metodología INVIAS 1998</i> , considerando las funciones de densidad del módulo resiliente normal, para la región R4.	80
Figura 4-14. Carga de diseño asociada a una confiabilidad del 90%, en las estructuras de pavimento de la <i>metodología INVIAS 1998</i> , considerando las funciones de densidad del módulo resiliente log-normal, para la región R4.	80
Figura 4-15. Comparación de los valores máximos del coeficiente de variación, del módulo resiliente, que garantiza una confiabilidad del 90% en el comportamiento mecánico de la estructura, para cada categoría de tránsito y entorno de subrasante, considerando las funciones de densidad normales y log-normales del módulo, en la región R4.	81
Figura 4-16. Función de densidad de falla R4-S1-T2-N-30%. Cálculo de la confiabilidad asociada a la carga mínima del rango de tránsito para una estructura de pavimento con el suelo más desfavorable (S1), el rango de tránsito menor (T2) y una función de densidad del módulo resiliente normal con un coeficiente de variación del módulo del 30%, en la región R4.	83
Figura 4-17. Confiabilidad de las estructuras de pavimento, considerando las funciones de densidad del módulo resiliente normal, para la región R4.	84
Figura 4-18. Confiabilidad de las estructuras de pavimento, considerando las funciones de densidad del módulo resiliente log-normal, para la región R4.	84
Figura 4-19. Comparación de las envolventes de confiabilidad de las estructuras de pavimento, asociada a las funciones de densidad del módulo resiliente normal y log-normal, para la región R4.	85
Figura 4-20. Comparación de los valores máximos del coeficiente de variación que garantiza una confiabilidad del 90%, en el comportamiento mecánico de la estructura, para cada categoría de tránsito y entorno de subrasante, considerando las funciones de densidad Normales y Log-normales del módulo resiliente, en la región R4.	87

Figura 7-1. Función de densidad normal del módulo resiliente para suelos tipo S1 (Convenciones de funciones: CV=10% - línea azul, CV=30% - línea roja, CV=50% - línea verde, CV=70% - línea morada).	97
Figura 7-2. Función de densidad normal del módulo resiliente para suelos tipo S2 (Convenciones de funciones: CV=10% - línea azul, CV=30% - línea roja, CV=50% - línea verde, CV=70% - línea morada).	98
Figura 7-3. Función de densidad normal del módulo resiliente para suelos tipo S3 (Convenciones de funciones: CV=10% - línea azul, CV=30% - línea roja, CV=50% - línea verde, CV=70% - línea morada).	98
Figura 7-4. Función de densidad log-normal del módulo resiliente para suelos tipo S1 (Convenciones de funciones: CV=10% - línea azul, CV=30% - línea roja, CV=50% - línea verde, CV=70% - línea morada).	99
Figura 7-5. Función de densidad log-normal del módulo resiliente para suelos tipo S2 (Convenciones de funciones: CV=10% - línea azul, CV=30% - línea roja, CV=50% - línea verde, CV=70% - línea morada).	99
Figura 7-6. Función de densidad log-normal del módulo resiliente para suelos tipo S3 (Convenciones de funciones: CV=10% - línea azul, CV=30% - línea roja, CV=50% - línea verde, CV=70% - línea morada).	100
Figura 7-7. Relación entre el coeficiente de variación (CV) con la probabilidad que el módulo resiliente (M_r) sea menor al rango mínimo establecido en la <i>metodología INVIAS 1998</i> (RM) y con la probabilidad de la mediana del módulo resiliente ($p(M_e)$) para las funciones de densidad normal de suelo tipo S1.	101
Figura 7-8. Relación entre el coeficiente de variación (CV) con la probabilidad que el módulo resiliente (M_r) sea menor al rango mínimo establecido en la <i>metodología INVIAS 1998</i> (RM) y con la probabilidad de la mediana del módulo resiliente ($p(M_e)$) para las funciones de densidad normal de suelo tipo S2.	102
Figura 7-9. Relación entre el coeficiente de variación (CV) con la probabilidad que el módulo resiliente (M_r) sea menor al rango mínimo establecido en la <i>metodología INVIAS 1998</i> (RM) y con la probabilidad de la mediana del módulo resiliente ($p(M_e)$) para las funciones de densidad normal de suelo tipo S3.	102
Figura 7-10. Relación entre el coeficiente de variación (CV) con la probabilidad que el módulo resiliente (M_r) sea menor al rango mínimo establecido en la <i>metodología INVIAS 1998</i> (RM) y con la probabilidad de la mediana del módulo resiliente ($p(M_e)$) para las funciones de densidad log-normal de suelo tipo S1.	103
Figura 7-11. Relación entre el coeficiente de variación (CV) con la probabilidad que el módulo resiliente (M_r) sea menor al rango mínimo establecido en la <i>metodología INVIAS 1998</i> (RM) y con la probabilidad de la mediana del módulo resiliente ($p(M_e)$) para las funciones de densidad log-normal de suelo tipo S2.	103
Figura 7-12. Relación entre el coeficiente de variación (CV) con la probabilidad que el módulo resiliente (M_r) sea menor al rango mínimo establecido en la <i>metodología INVIAS 1998</i> (RM) y con la probabilidad de la mediana del módulo resiliente ($p(M_e)$) para las funciones de densidad Log-normal de suelo tipo S3.	104
Figura 7-13. Funciones de densidad del módulo resiliente para el suelo tipo S1. (Convenciones de funciones: CV=10% - línea roja, CV=30% - línea azul, CV=50% - línea morada, CV=70% - línea negra).	105

Figura 7-14. Funciones de densidad del módulo resiliente para el suelo tipo S2. (Convenciones de funciones: CV=10% - línea roja, CV=30% - línea azul, CV=50% - línea morada, CV=70% - línea negra).....	105
Figura 7-15. Funciones de densidad para el módulo resiliente del suelo tipo S3. (Convenciones de funciones: CV=10% - línea roja, CV=30% - línea azul, CV=50% - línea morada, CV=70% - línea negra).....	106
Figura 8-1. Carga de diseño asociada a una confiabilidad del 90%, en las estructuras de pavimento de la <i>metodología INVIAS 1998</i> , considerando las funciones de densidad del módulo resiliente normal, para la región R2.....	111
Figura 8-2. Carga de diseño asociada a una confiabilidad del 90%, en las estructuras de pavimento de la <i>metodología INVIAS 1998</i> , considerando las funciones de densidad del módulo resiliente normal, para la región R4.....	111
Figura 8-3. Carga de diseño asociada a una confiabilidad del 90%, en las estructuras de pavimento de la <i>metodología INVIAS 1998</i> , considerando las funciones de densidad del módulo resiliente log-normal, para la región R2.	112
Figura 8-4. Carga de diseño asociada a una confiabilidad del 90%, en las estructuras de pavimento de la <i>metodología INVIAS 1998</i> , considerando las funciones de densidad del módulo resiliente log-normal, para la región R4.	112
Figura 8-5. Comparación de los valores máximos del coeficiente de variación, del módulo resiliente, que garantiza una confiabilidad del 90%, en el comportamiento mecánico de la estructura, para cada categoría de tránsito y entorno de subrasante, considerando las funciones de densidad Normales y Log-normales del módulo resiliente, en la región R2.	113
Figura 8-6. Comparación de los valores máximos del coeficiente de variación que garantiza una confiabilidad del 90%, en el comportamiento mecánico de la estructura, para cada categoría de tránsito y entorno de subrasante, considerando las funciones de densidad Normales y Log-normales del módulo resiliente, en la región R4.	114
Figura 8-7. Confiabilidad de las estructuras de pavimento, considerando las funciones de densidad del módulo resiliente normal, para la región R2.	115
Figura 8-8. Confiabilidad de las estructuras de pavimento, considerando las funciones de densidad del módulo resiliente normal, para la región R4.	115
Figura 8-9. Confiabilidad de las estructuras de pavimento, considerando las funciones de densidad del módulo resiliente log-normal, para la región R2.....	116
Figura 8-10. Confiabilidad de las estructuras de pavimento, considerando las funciones de densidad del módulo resiliente log-normal, para la región R4.....	116
Figura 8-11. Comparación de las envolventes de confiabilidad de las estructuras de pavimento, asociada a las funciones de densidad del módulo resiliente normal y log-normal, para la región R2.....	117
Figura 8-12. Comparación de las envolventes de confiabilidad de las estructuras de pavimento, asociada a las funciones de densidad del módulo resiliente normal y log-normal, para la región R4.....	117
Figura 8-13. Comparación de los valores máximos del coeficiente de variación que garantiza una confiabilidad del 90%, en el comportamiento mecánico de la estructura, para cada categoría de tránsito y entorno de subrasante, considerando las funciones de densidad normales y log-normales del módulo resiliente, en la región R2.....	118
Figura 8-14. Comparación de los valores máximos del coeficiente de variación que garantiza una confiabilidad del 90%, en el comportamiento mecánico de la estructura, para cada categoría	

de tránsito y entorno de subrasante, considerando las funciones de densidad normales y log-normales del módulo resiliente, en la región R4..... 119

TABLA DE TABLAS

Tabla 1.1. Factores que causan incertidumbre en la evaluación del desempeño de un pavimento (Kalita y Rajbongshi, 2015).	15
Tabla 2.1. Correlación entre el valor del CBR [%] y el módulo resiliente [psi] (tomado de Rondon y Reyes (2015, p. 356)).	20
Tabla 2.2. Valores de coeficientes estructurales (<i>ai</i>) (tomado de INVIAS y Ministerio de Transporte de Colombia, 1998, p. 71).	24
Tabla 2.3. Valores del coeficiente de drenaje (<i>mi</i>) (tomado de INVIAS y Ministerio de Transporte de Colombia, 1998, p. 71).	25
Tabla 2.4. Materiales y especificaciones (tomado de INVIAS y Ministerio de Transporte de Colombia, 1998, p. 57).	26
Tabla 2.5. Regiones climáticas según temperatura y precipitación (INVIAS y Ministerio de Transporte de Colombia, 1998, p. 50).	26
Tabla 2.6. Entornos de la resistencia (INVIAS y Ministerio de Transporte de Colombia, 1998, p. 45).	27
Tabla 2.7. Rangos de tránsito (INVIAS y Ministerio de Transporte de Colombia, 1998, p. 18).	27
Tabla 2.8. Rangos contemplados en las cartas de diseño (INVIAS y Ministerio de Transporte de Colombia, 1998, p. 72).	27
Tabla 2.9. Modelos de predicción de la respuesta de las capas asfálticas de pavimento a la fatiga (Rondón et al., 2012, pp. 113–123).	29
Tabla 2.10. Confiabilidad recomendada para el diseño de pavimentos (AASHTO, 1993).	32
Tabla 2.11. Confiabilidad y factor de seguridad (AASHTO, 1993).	33
Tabla 2.12. Funciones de distribución más utilizadas en @Risk® (Datos recopilados de la Guía para el uso de @Risk (Palisade Corporation, 2013))*	36
Tabla 2.13. Funciones de probabilidad utilizadas en los diseños por confiabilidad en geotécnica, para representar la variabilidad de las propiedades de los suelos (Mattos, 2015).	39
Tabla 2.14. Parámetros estadísticos de las variables de diseño (módulo elástico de la subrasante: E_3) (modificado de Dilip et al., 2013).	40
Tabla 2.15. Funciones de densidad de probabilidad que caracterizaron la variable Módulo Resiliente (M_r) (tomado de Rodríguez, 2014).	41
Tabla 2.16. Resumen de propiedades índices de suelos en el Valle de Aburrá (tomado de Viviescas, 2016, p. 74).	43
Tabla 2.17. Resumen propiedades de depuración y ajuste del N_{60} para todos los mantos evaluados (tomado de Viviescas, 2016, p. 86).	43
Tabla 2.18. Resumen de la variabilidad inherente de las propiedades de resistencia (Phoon et al., 1995).	44
Tabla 2.19. Resumen de la variabilidad inherente del terreno según ensayo (Phoon et al., 1995).	44
Tabla 2.20. Valores típicos de coeficientes de variación de las propiedades de los suelos (Uzielli et al., 2007).	45

Tabla 3.1. Áreas de las regiones climáticas en Colombia y Antioquia (Ministerio de las TIC, 2018).	55
Tabla 3.2. Áreas de las regiones climáticas en el Valle de Aburrá.....	57
Tabla 3.3. Coeficientes estructurales y de drenaje del pavimento correspondientes a las regiones climáticas R2 y R4 (tomado de INVIAS y Ministerio de Transporte (1998)).	61
Tabla 3.4. Espesores de diseño asociados a las regiones climáticas, la resistencia de la subrasante y la categoría del tránsito (tomado de INVIAS y Ministerio de Transporte (1998)).	61
Tabla 3.5. Valores medios (ϕ') desviaciones estándar (s) del módulo resiliente para diferentes coeficientes de variación (CV), en cada categoría de subrasante establecida.	63
Tabla 4.1. Categorías de diseño definidas para el Valle de Aburrá	69
Tabla 8.1. Ajuste estadístico de las funciones de densidad de falla de cada estructura para la región R2.....	108
Tabla 8.2 Ajuste estadístico de las funciones de densidad de falla de cada estructura para la región R2.....	109

Análisis por confiabilidad del Modelo de Diseño AASHTO-93 para pavimentos flexibles en el Valle de Aburra.

RESUMEN

El desarrollo y la aplicación de la ingeniería de pavimentos colombiana en sus fases de exploración geotécnica, diseño estructural y construcción, ha traído consigo un conjunto de aprendizajes que han sido reservados en la experiencia particular de cada equipo de trabajo. La necesidad de construir pavimentos con mejores especificaciones técnicas y mayores periodos de servicio, que atiendan el creciente desarrollo del país, implica modelar con mayor rigor la variabilidad en las propiedades geotécnicas y en los esfuerzos externos e internos que soportan, con el fin de garantizar estructuras confiables.

El estudio geotécnico del suelo para el diseño de estructuras de pavimento se concentra, generalmente, en las capas superiores de los perfiles estratigráficos (hasta 2.0 m. de profundidad con nivel de referencia en la superficie, aproximadamente); particularmente en vías construidas sobre terrenos planos, vías urbanas y vías rurales de segundo y tercer orden, donde la viabilidad económica de los proyectos se garantiza con la aproximación altimétrica entre el alineamiento del corredor vial proyectado y el terreno natural existente. Varias investigaciones han demostrado que el número estructural de los materiales de construcción y el módulo de resiliencia de la subrasante tienen el mayor efecto sobre la capacidad de carga de la estructura. En consecuencia, la variación de las propiedades geotécnicas del suelo de cimentación interfiere directamente en el dimensionamiento y servicio final del elemento diseñado.

El presente proyecto está enfocado en el análisis de confiabilidad del *método AASHTO-93* asociado a la función de probabilidad del módulo resiliente de la subrasante, empleando varias estructuras establecidas por el Manual de Diseño de Pavimentos Asfálticos en Vías con Medios y Altos Volúmenes de Tránsito 1998, que fueron calculadas con el método de diseño previamente indicado.

Se obtuvo que la función de densidad del módulo resiliente que mayor confiabilidad induce, en las estructuras de pavimento analizadas, fue la log-normal, admitiendo coeficientes de variación del módulo resiliente entre 28% y 53% para pavimentos de vía primarias (autopistas y arterias) y secundarias (colectoras), definidas por el *método AASHTO-93*; y de 21% y 43% para garantizar una confiabilidad del 90% en los pavimentos, establecida por la *metodología INVIAS 1998*. Sin embargo, los rangos de coeficiente de variación del módulo establecidos son considerablemente inferiores a los valores geotécnicos obtenidos a nivel nacional e internacional, por lo cual hay una alta posibilidad que las estructuras de pavimento analizadas fallen antes de cumplir su vida de servicio.

Palabras Clave: Diseño de pavimentos, módulo resiliente, función de distribución, confiabilidad, *método AASHTO-93* y *metodología INVIAS 1998*.

Reliability analysis of the AASHTO-93 Design Method for flexible pavements in the Aburra Valley.

ABSTRACT

The development and application of pavement engineering in Colombia, in its phases of geotechnical exploration, structural design and construction, has led to a series of learnings that has remained within each work team. The need to build pavements with better technical specifications and longer service periods, attending a growing trend in the country's development, requires a more rigorous modelling of the geotechnical properties variability and the internal and external stresses it withstands, warranting more reliable structures.

The ground investigation for pavement design is mainly focused on the surficial layers of the soil profile (on the upper 2.0 m); particularly, for roads over flat terrains, urban areas, secondary or tertiary rural roads, where the economic viability of the project is dependent on difference between the vertical alignment design of the corridor and the natural topography. Several investigations have shown that the structural number of the construction materials and the resilient modulus of the subgrade have the greatest effect on the load capacity of the structure. Thus, the variability of the geotechnical properties has a direct impact in the thickness and serviceability of the structure designed.

The present project is focused on the reliability analysis of the *AASHTO-93 method* associated with the probability function of the subgrade's resilient modulus. Several pavement structures recommended in the Asphalt Pavements with Medium and High Traffic Design Manual (1998) were used on the analysis. These structures were calculated using the aforementioned method.

The probability density function for the resilient modulus with more reliable results, for the analyzed pavement structures, was the log-normal with a coefficient of variation between 28% and 53% for primary and secondary roads, as defined by the *AASHTO-93 method*; and between 21% and 43% for a 90% reliability of the structures, as defined by the INVIAS 1998 manual. However, these coefficients of variation are considerably lower than those reported nationally and internationally, hence, there is a significant possibility that the pavement structures analyzed fail before reaching its projected service life.

Key Words: Pavement design, resilient module, distribution function, reliability, *AASHTO-93 Method* and *INVIAS 1998 Methodology*.

1 INTRODUCCIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Según Montejo (2006, p. XXIII), “en la actualidad, la tecnología de los pavimentos ha logrado un altísimo desarrollo. Gracias a lo anterior, constituye un área altamente especializada y produce (de manera constante) una gran cantidad de información, un tanto dispersa y desordenada”.

La evaluación del desempeño de una estructura de pavimento presenta altas incertidumbres por la complejidad de la predicción de sus variables: estimación del tráfico, variabilidad de las características de los materiales y varios parámetros de diseño que se suponen y aproximan con base en la experiencia de cada profesional (Kalita y Rajbongshi, 2015). La *Tabla 1.1* presenta los factores de incertidumbre de los parámetros principales de diseño.

Tabla 1.1. Factores que causan incertidumbre en la evaluación del desempeño de un pavimento (Kalita y Rajbongshi, 2015).

PARÁMETRO	FACTOR
Carga de diseño	<ul style="list-style-type: none">• Comportamiento del crecimiento del tránsito.• Factores empíricos de equivalencia de daño.• Factor camión.
Vida útil del pavimento	<ul style="list-style-type: none">• Propiedades de los materiales.• Suposiciones sobre el comportamiento del material.• Aproximaciones en los métodos de diseño.• Condiciones de carga.• Correlación empírica y factores de calibración de las funciones de transferencia de la vida útil del pavimento.

El Manual de Diseño de Pavimentos Asfálticos en Vías con Medios y Altos Volúmenes de Tránsito del Instituto Nacional de Vías (INVIAS), versión 1998, estableció los métodos de diseño que más se ajustaron a las condiciones particulares del país con base en la minimización del error en la diferencia entre el número de ejes equivalentes soportados por la estructura existente analizada y los calculados empleando dichos métodos, es decir, buscando que el mismo tienda a cero con una varianza mínima. Aunque el método finalmente seleccionado fue el *AASHTO-93*, la calibración mostró una gran dispersión entre las varianzas de errores de cada método evaluado en el caso colombiano (INVIAS y Ministerio de Transporte de Colombia, 1998, p. 70).

Rondon y Reyes (2015) señalaron que los cambios en el tiempo de las condiciones de tránsito o del clima de la zona de estudio puedan hacer que los métodos de diseño empíricos pierdan confiabilidad en la predicción del dimensionamiento del pavimento. Además, los autores mencionados señalan que los métodos de diseño suponen que, cumpliendo con ciertos requisitos de “calidad” en los ensayos de caracterización, las capas granulares no experimentarán comportamientos deficientes bajo cargas cíclicas, situación que ha sido puesta en duda por ellos. Sobre el particular, señalan que los ensayos que caracterizan los materiales granulares y

cuantifican su calidad de forma indirecta no permiten predecir la rigidez y la resistencia a la deformación permanente que experimentan los materiales bajos una carga cíclica.

Según Rodríguez et al. (2016), los datos de entrada y salida del *modelo AASHTO-93* son deterministas, pero los proyectos de ingeniería de pavimento poseen un grado de incertidumbre en el diseño, la construcción y la operación; lo que se traduce en que no puede garantizarse un adecuado desempeño de la estructura en forma absoluta con este tipo de resultados. En este orden de ideas, se requiere un análisis de probabilidad de éxito que permita una modelación más acertada de las incertidumbres previamente mencionadas.

Reyes (2003) indicó que la validez de los diseños racionales se fundamenta en el respeto sobre su dominio y utilización, aún si parece muy restrictivo, y en los valores de los parámetros de entrada, los cuales deben provenir forzosamente de la medición en el laboratorio del módulo elástico y la ley de fatiga de los materiales.

Luo et al. (2014) señalaron que los datos de entrada de la MEPDG (Mechanistic - Empirical Pavement Design Guide) (carga de tráfico, clima, propiedades estructurales y de materiales, espesores, entre otros) presentan una gran incertidumbre en el diseño y construcción de pavimentos. Thyagarajan et al. (2011) presentaron que la MEPDG se basa en un conjunto de valores de variabilidad predeterminados obtenidos de una base de datos de rendimiento en lugar de los parámetros de entrada específicos del sitio que inducen dichas incertidumbres

Particularmente, el diseño de pavimentos flexibles en los proyectos viales colombianos está seriamente limitado por tres (3) condiciones específicas: la baja inversión económica en la exploración de los suelos, la correlación de parámetros y variables de diseño y la aplicación inadecuada de los métodos de dimensionamiento. De allí la variabilidad en el comportamiento mecánico y la vida de servicio entre las estructuras construidas y las realmente requeridas, específicamente en la idiosincrasia de la ingeniería colombiana donde se presenta una gran dificultad en la sincronización entre el diseño técnico y el proceso de construcción.

La aplicación de los modelos probabilísticos está enfocada a dar solución a las limitaciones mencionadas. Su enfoque se direccionará a la obtención de modelos de distribución de falla que incorporen condiciones de variabilidad en el diseño. En particular, este proyecto se enmarcará en el análisis de la variabilidad de la condición que define la propiedad de recuperación del suelo de apoyo ante cargas cíclicas (módulo resiliente).

Con base en lo señalado, la pregunta de esta investigación es:

¿Cuál es la incidencia de la variabilidad del módulo resiliente de la subrasante en la confiabilidad de estructuras de pavimento flexible calculado por el *método AASHTO-93*?

1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO

GENERAL

Evaluar la confiabilidad de estructuras de pavimento flexible calculadas por el *método AASHTO-93*, considerando la variabilidad del módulo resiliente del suelo de subrasante.

ESPECÍFICOS

1. Evaluar las funciones de distribución de probabilidad del módulo resiliente para los rangos de subrasantes definidas en la *metodología INVIAS 1998*.
2. Determinar la variación de la probabilidad de falla de cada estructura analizada mediante un análisis paramétrico.
3. Definir las funciones de distribución del módulo resiliente que generen mayor confiabilidad en las estructuras estudiadas, a partir del análisis estadístico de las funciones de probabilidad de falla obtenidas para cada pavimento.
4. Comprobar la confiabilidad de una estructura de pavimento flexible diseñada, bajo la *metodología INVIAS 1998*, empleando las funciones de distribución del módulo resiliente previamente definidas.

1.3 METODOLOGÍA

1. **Revisión de la bibliografía existente:** Inicialmente, se revisó la literatura técnica existentes sobre las funciones de distribución de las propiedades de los suelos de subrasante obtenidas en otros proyectos, específicamente el módulo resiliente, y el análisis de estructuras de pavimento evaluadas por métodos probabilísticos.
2. **Selección de las variables de diseño del método AASHTO-93:** Se definió las variables discretas iniciales y los espesores de las estructuras flexibles más apropiadas para el proyecto, según la *Metodología INVIAS 1998*, las cuales serán implementadas en el *modelo AASHTO-93* para los análisis por confiabilidad.
3. **Modelación por métodos probabilísticos:** Consistió en el análisis paramétrico de la probabilidad de falla de cada estructura seleccionada, considerando las características de las funciones de distribución de densidad del módulo resiliente de la subrasante; a partir de los rangos de carga vehicular y módulo establecidos en la *metodología INVIAS 1998*. Este procedimiento se efectuó para diferentes coeficientes de variación en cada estructura analizada. La modelación se realizó a partir del software estadístico seleccionado y se empleó el método de Monte Carlo.
4. **Comparación de resultados y análisis:** Se generó un análisis de sensibilidad entre la distribución del módulo resiliente y la probabilidad de falla de cada estructura analizada. El proyecto permitió analizar los resultados desde dos enfoques: La confiabilidad de las

Título: Análisis por confiabilidad del modelo de diseño AASHTO-93 para pavimentos flexibles en el Valle de Aburra.

estructuras establecidas por la *metodología INVIAS 1998*, que fue insumo del diseño, y la relación entre la variabilidad del módulo resiliente de la subrasante, con la confianza de la estructura flexible obtenida bajo el *método AASHTO-93*.

5. **Estructuración del documento:** Finalmente, se elaboró el documento final del Trabajo de Investigación.

2 MARCO DE REFERENCIA

Los pavimentos son estructuras viales multicapa, es decir, están constituidos por un conjunto de capas superpuestas, relativamente horizontales, compuestas por materiales seleccionados (Rondon y Reyes, 2015, p. XXXVIII y XXIX). Estas estructuras son diseñadas para soportar las cargas impuestas por el tránsito y por las condiciones ambientales (función estructural). Asimismo, deben diseñarse con el fin de ofrecer un paso cómodo, seguro y confortable al parque automotor que se imponga sobre su superficie en determinado periodo de tiempo (objetivo funcional). Las cargas dinámicas de los vehículos que transitan sobre estas estructuras producen en las interfaces de las capas esfuerzos cíclicos y deformaciones verticales, horizontales y de corte. El pavimento se soporta sobre una subrasante natural o sobre una plataforma, que puede ser subrasante mejorada, estabilizada, o un terraplén, que se denomina capa de conformación (Rondon y Reyes, 2015, p. XXXVIII y XXIX).

En nuestro medio los pavimentos se clasifican en: pavimentos flexibles, pavimentos semi – rígidos o semi – flexibles, pavimentos rígidos y pavimentos articulados (Montejo, 2006, p. 2).

Según Rondon y Reyes (2015, p. 521), las variables de diseño de pavimentos se pueden tipificar en dos categorías: directas e indirectas. Directas son aquellas variables que inciden en el espesor de la capa de pavimento (tránsito, subrasante, clima, propiedades mecánicas de los materiales, factores de seguridad), e indirectas son aquellas que inciden en la selección del tipo de estructura que se va a dimensionar (costos, materiales disponibles en la zona, topografía, estética, entre otros).

2.1 VARIABLES FUNDAMENTALES DE DISEÑO

El diseño de pavimentos flexibles considera los siguientes parámetros fundamentales de diseño

2.1.1 Módulo Resiliente

El módulo resiliente (M_r) es la relación que existe entre la magnitud del esfuerzo desviador cíclico ($q = \sigma_1 - \sigma_3$) en compresión triaxial y la deformación axial recuperable (elástica) o resiliente (ϵ_r), para una presión de confinamiento constante (Rondon & Reyes, 2015, p. 355).

$$M_r = \frac{q}{\epsilon_r} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\epsilon_r} \quad \text{Ecuación 2-1}$$

Donde,

- M_r es el módulo resiliente del material
- σ_1 es el esfuerzo cíclico axial.
- σ_3 es la presión de confinamiento.
- ϵ_r es la deformación unitaria vertical resiliente o recuperable

Título: Análisis por confiabilidad del modelo de diseño AASHTO-93 para pavimentos flexibles en el Valle de Aburra.

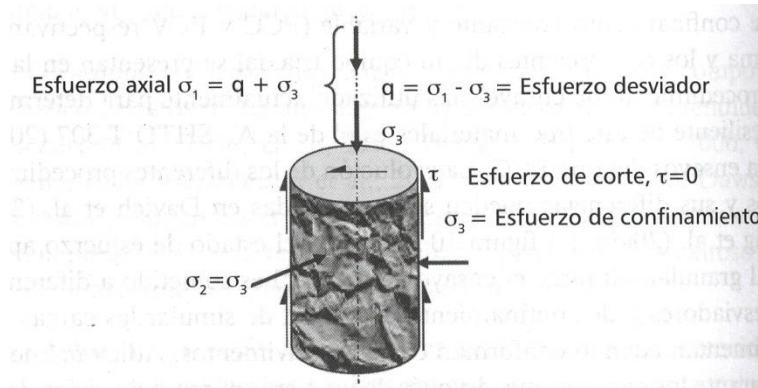


Figura 2-1. Estado de esfuerzos durante la ejecución del ensayo de módulo resiliente. (tomado de Rondon y Reyes (2015, p. 355)).

Los métodos usualmente utilizados para obtener el módulo resiliente son tres: ensayos de laboratorio, ensayos no destructivos y correlaciones con propiedades del suelo. Validando estas prácticas, el *Diseño Mecánico Empírico de Pavimentos (MEPDG)* menciona que el módulo de resiliencia debe ser obtenido de tres formas análogas, con base en tres niveles de diseño: en el laboratorio, correlacionándolo con otras propiedades del suelo y conseguido a partir de valores típicos basados en la clasificación del suelo.

Como en la práctica es de difícil determinación experimental el cálculo de esta variable en la subrasante, ya sea por falta de equipos o de la definición acertada de la trayectoria de esfuerzo, lo que se hace tradicionalmente es correlacionarla con el valor del CBR (ensayo desarrollado por Stanton y Porter en 1929) a través de múltiples ecuaciones disponibles en la literatura de referencia.

Tabla 2.1. Correlación entre el valor del CBR [%] y el módulo resiliente [psi] (tomado de Rondon y Reyes (2015, p. 356)).

AUTORES	ECUACIÓN
Método AASHTO 93 SFG (Heukelom & Foster, 1960)	$M_r = 1500 * CBR$ para $CBR < 10\%$ Ecuación 2-2
AASHTO (1993) SFG	$M_r = 4326 * \ln(CBR) + 241$ Ecuación 2-3
Poulsen & Stubstad (1980)	$M_r = 1500 * CBR^{0.73}$ Ecuación 2-4
Green & Hall 1975)	$M_r = 5409 * CBR^{0.711}$ Ecuación 2-5
Uzan, Ishai, Hoffman, Wiseman, & Livneh (1977)	$M_r = 2100 * CBR$ para $CBR < 10\%$ Ecuación 2-6
(Powell, Potter, Mayhew, & Nunn, 1984)	$M_r = 2640 * CBR^{0.64}$ para $CBR < 12\%$ Ecuación 2-7
Lister & Powell (1987)	$M_r = 2555 * CBR^{0.64}$ para $CBR < 10\%$ Ecuación 2-8
MOP (2004)	$M_r = 2553 * CBR^{0.55}$ para $CBR < 12\%$ Ecuación 2-9
	$M_r = 3315 * CBR^{0.55}$ para $12\% < CBR < 80\%$ Ecuación 2-10

Rondon y Reyes (2015) señalan que cuando se utilizan las anteriores ecuaciones surgen múltiples incertidumbres:

- ✓ El ensayo CBR es una medida empírica e indirecta de la resistencia al corte y de la rigidez del material en condiciones drenadas que se mide bajo carga monotónica, y en pavimento la carga es cíclica.
- ✓ Los niveles de esfuerzo en un pavimento son mucho más bajos que aquellos que se generan en la muestra cuando se realiza el ensayo CBR.

2.1.2 Carga de diseño (tránsito)

Consiste en la identificación, caracterización y conteo de los vehículos que circulan por una vía, para una posterior conversión a números de ejes equivalentes respecto un patrón de referencia (generalmente es un eje simple tipo tándem de 8.2t. o 13t.), que depende de la magnitud, configuración de ejes, presiones de inflado, velocidad de circulación y número de llantas.

La expansión del número de ejes equivalentes del año base se realiza empleando la *Ecuación 2-11* (INVIAS y Ministerio de Transporte de Colombia, 1998, p. 19).

$$N = (N_o - N_c) * \frac{(1+r)^n - 1}{r} + N_c \quad \text{Ecuación 2-11}$$

Donde,

- N** Es el número de ejes equivalentes de 8.2 t. que circularán por el carril de diseño durante el periodo de diseño.
- N_o** Es el número de ejes equivalentes de 8.2 t. que circularán por el carril de diseño en el año base o de puesta en servicio del pavimento.
- N_c** Es el número de ejes equivalentes de 8.2 t. ya soportados por el carril de diseño del pavimento durante la construcción del mismo.
- r** Es la tasa de crecimiento anual de tránsito de vehículos comerciales durante el periodo de diseño.
- n** Es el número de años del periodo de diseño.

El número de ejes equivalentes de 8.2 t. en el año base o de puesta de servicio del pavimento se calcula de acuerdo a la *Ecuación 2-12* (INVIAS y Ministerio de Transporte de Colombia, 1998, p. 20).

$$N_o = [365 * (\sum C_i) * F_c * (1 + r')^X + N_a + N_g] * F_d * F_{ca} + N_c \quad \text{Ecuación 2-12}$$

Donde,

- N_o** Es el número de ejes equivalentes que circularán por el carril de diseño en el año base o de puesta en servicio del pavimento.

- F_c Es el factor de equivalencia global para los vehículos comerciales o factor camión global.
$$F_c = \frac{\sum(C_i * F_i)}{\sum C_i}$$
- C_i Es la cantidad de vehículos comerciales diarios del tipo i que circula por la ruta en el año de relevamiento y estudio del pavimento.
- F_i Es el factor de equivalencia, o factor camión, que corresponde a cada pasada del vehículo comercial tipo i .
- r' Es la tasa de crecimiento anual de tránsito comercial entre el estudio de tránsito y la construcción de la vía
- x Es el tiempo, en años, transcurrido entre el proyecto y la puesta en servicio del pavimento.
- N_a Es el número de ejes equivalentes de en el año base o de puesta en servicio, atraído de otras carreteras.
- N_g Es el número de ejes equivalentes en el año base o de puesta en servicio, generado por la mejora de la carretera.
- N_C Es el número de ejes equivalentes ya soportados por el carril de diseño del pavimento durante la construcción del mismo.
- F_d Factor de distribución direccional.
- F_{ca} Factor de distribución por carril.

Finalmente, se corrige el número de ejes equivalentes proyectado para garantizar la confiabilidad deseada en la determinación del número de ejes equivalentes.

$$N' = 10^{0.05 * Z_r} * N \quad \text{Ecuación 2-13}$$

Donde,

N' Número de ejes equivalentes de 8.2t. de diseño corregidos.

N Número de ejes equivalentes de 8.2t. de diseño corregidos.

Z_R Desviación normar estándar correspondiente a una distribución normal y a la confiabilidad deseada.

2.2 MÉTODOS DE DISEÑO DE PAVIMENTOS FLEXIBLES

Los métodos de diseño de pavimentos flexibles pueden ser: empíricos o mecánico empíricos, analíticos mecanicistas o racionales, elementos finitos (FEM) y elementos discretos (DEM). En el caso de los métodos empíricos, se correlaciona el comportamiento de los pavimentos *in situ*, a través de observaciones y mediciones de campo, con los factores que causan los mecanismos de degradación de la estructura. A diferencia de los métodos empíricos, los analíticos tienen en cuenta cómo el estado de esfuerzo y deformación que experimentan las capas que conforman la estructura de pavimento influyen en el comportamiento de éste. Los modelos de elementos finitos (FEM) determinan los esfuerzos y las deformaciones mediante ecuaciones constitutivas. Finalmente, la metodología de elementos discretos (DEM) donde se busca calcular las fuerzas y desplazamientos entre partículas de un esqueleto granular (Rondon y Reyes, 2015, pp. 365–381).

Las investigaciones desarrolladas en la Cement and Concrete Association (Reino Unido) han indicado que un pavimento de adoquines se comporta de manera similar a uno flexible (Montejo, 2006, p. 496).

2.2.1 Método AASHTO-93

Según Rondon y Reyes (2015), el método AASHTO-93 corresponde a un método empírico que correlaciona el comportamiento de los pavimentos *in situ*, a través de las observaciones y mediciones efectuadas en campo, con los factores que causan los mecanismos de degradación de la estructura. Los factores más importantes son las cargas impuestas por el tránsito, las condiciones ambientales (temperatura y precipitación) a las cuales se encuentra sometida la estructura, el tipo de suelo o terreno de fundación (subrasante) y la calidad de los materiales empleados.

Los espesores de cada una de las capas que componen la estructura de pavimento flexible convencional (carpeta asfáltica, base granular y subbase granular) se determinan a través de las siguientes ecuaciones.

$$h_1 = \frac{SN_1}{a_1} \quad \text{Ecuación 2-14}$$

$$h_2 = \frac{SN_2 - SN_1^*}{a_2 * m_2} \quad \text{Ecuación 2-15}$$

$$h_3 = \frac{SN_3 - SN_2^*}{a_3 * m_3} \quad \text{Ecuación 2-16}$$

Donde,

h_1, h_2 y h_3	Son los espesores de cada capa de la estructura de pavimento (carpeta asfáltica, base granular y subbase granular, respectivamente) [in].
SN_1, SN_2 y SN_3	Son los números estructurales de cada capa de la estructura de pavimento (carpeta asfáltica, base granular y subbase granular, respectivamente) [in].
SN_1^*, SN_2^* y SN_3^*	Son los números estructurales ajustados de cada capa de la estructura de pavimento (carpeta asfáltica, base granular y subbase granular, respectivamente) [in].
a_1, a_2 y a_3	Son los coeficientes estructurales de cada capa de la estructura de pavimento (carpeta asfáltica, base granular y subbase granular, respectivamente).
m_2 y m_3	Son los coeficientes de drenaje de las capas granulares de la estructura de pavimento (base granular y subbase granular, respectivamente).

Los números estructurales de cada capa se calculan por medio de la siguiente expresión.

Ecuación 2-17

$$\log(W_{18}) = Z_r * S_0 + 9.36 * \log(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log\left(\frac{\Delta PSI}{4.2-1.5}\right)}{0.40 + \frac{1094}{(SN+1)^{5.19}}} + 2.32 * \log(M_R) - 8.07$$

Donde,

- W_{18}** Es el número estimado de ejes simples equivalentes de 8.2 t.
 Z_r Desviación estándar normal, la cual está asociada a una confiabilidad o probabilidad de que la sección de diseño se comporte satisfactoriamente bajo las condiciones de carga y ambiente, durante el periodo de diseño
 S_0 Error estandar combinado de la predicción del tránsito y la proyección del comportamiento.
 ΔPSI Diferencia entre el índice de servicio inicial (P_0) y el final (P_t).
 M_r Es el módulo resiliente de la capa subyacente [PSI].
 SN Es el número estructural [in].

2.2.2 Metodología INVIAS 1998.

La Metodología de Diseño presentada en INVIAS y Ministerio de Transporte (1998), que en adelante se llamará como *metodología INVIAS 1998*, corresponde a un procedimiento de diseño desarrollado en Colombia para pavimentos flexibles de carreteras interurbanas de dos o más carriles, y abarca todas las gamas probables de tránsito. La normativa se fundó en una combinación de métodos existentes (*AASHTO-93* y *racional* (mecánico – empírico)), la experiencia, la teoría de comportamiento estructural y los materiales disponibles (INVIAS y Ministerio de Transporte de Colombia, 1998, p. 70).

Para la calibración y validación del método de diseño se utilizó la información sobre distintos segmentos de estudio de pavimentos existentes de la red vial nacional, evaluados en las diferentes etapas de la Investigación Nacional de Pavimentos. Si bien la calibración mostró una gran dispersión, permitió la selección del método de diseño usado en la verificación de las alternativas propuestas en las cartas. El método finalmente seleccionado fue el *AASHTO 1993*, con las siguientes consideraciones:

- El valor de error normal (S_0) se consideró igual a 0.44.
- El valor de desviación estándar normal (Z_r) es el correspondiente a un nivel de confiabilidad de 90%, asociado a la clasificación de la vía: colectoras o secundarias y arterias principales y autopistas o primarias.
- La pérdida de serviciabilidad se consideró un valor $\Delta PSI = 2.2$, correspondiente a una serviciabilidad inicial de 4.2 y un índice de serviciabilidad final de 2.0.
- Para la determinación de espesores se establecieron los valores de coeficientes estructurales (a_i) según la **Tabla 2.2**.

Tabla 2.2. Valores de coeficientes estructurales (a_i) (tomado de INVIAS y Ministerio de Transporte de Colombia, 1998, p. 71).

Título: Análisis por confiabilidad del modelo de diseño AASHTO-93 para pavimentos flexibles en el Valle de Aburra.

Mezcla densa en caliente	MDC $a_i = 0.44$	TMAP < 13 °C
	MDC $a_i = 0.37$	13 °C ≤ TMAP < 20 °C
	MDC $a_i = 0.30$	20 °C ≤ TMAP ≤ 30 °C
Mezcla densa en frío	MDF $a_i = 0.8 * 0.44$	TMAP < 13 °C
	MDF $a_i = 0.8 * 0.37$	13 °C ≤ TMAP < 20 °C
	MDF $a_i = 0.8 * 0.33$	20 °C ≤ TMAP ≤ 30 °C
Base estabilizada con emulsión asfáltica	BEE-1 $a_i = 0.20$	Agregado grueso
	BEE-2 $a_i = 0.20$	Agregado medio
	BEE-3 $a_i = 0.14$	Suelo
Base estabilizada con cemento	BEC-1 $a_i = 0.16$	A-1-a; A-1-b
	BEC-2 $a_i = 0.14$	A-3; A-2-4; A-2-5
	BEC-3 $a_i = 0.13$	A-2-6; A-2-7; A-4
		A-5; A-6; A-7
Base granular	BG-1, BG-2	$a_i = 0.14$
Sub-base granular	SBG-1, SBG-2	$a_i = 0.12$

- Los valores de los coeficientes de drenaje (m_i) utilizados para las capas granulares se determinaron de acuerdo con los niveles de precipitación, calidad de drenaje y considerando que el pavimento estará a niveles de humedad próximos a la saturación por lapsos cercanos al 15% del tiempo de exposición.

Tabla 2.3. Valores del coeficiente de drenaje (m_i) (tomado de INVIAS y Ministerio de Transporte de Colombia, 1998, p. 71).

Precipitación mm/año	m_i
< 2000	1.00
2000 - 4000	0.90
> 4000	0.80

- Las estructuras de pavimento establecidas están enmarcadas en diferentes combinaciones de los siguientes materiales estandarizados por el Instituto Nacional de Vías (INVIAS y Ministerio de Transporte de Colombia, 2013), y se presentan en la *Tabla 2.4.*

Título: Análisis por confiabilidad del modelo de diseño AASHTO-93 para pavimentos flexibles en el Valle de Aburra.

Tabla 2.4. Materiales y especificaciones (tomado de INVIAS y Ministerio de Transporte de Colombia, 1998, p. 57).

SIMBOLO	CODIGO	MATERIAL	ESPECIFICACIONES
		Sub-base INV 320	
	SBG-1	Agregado grueso	T _{MAX} 50 mm, % Pasa #4 = 30 a 70%, Pasa # 200 = 4 a 20%, D ≤ 50%, P ≤ 12%-18%, EA ≥ 25%, IP ≤ 6 , CBR > 20-30-40 , 95% de Proctor Modificado.
		Base granular INV 330	Tr ≥ 50%, D ≤ 40%, P ≤ 12%-18%, I _a ≤ 35%, CBR ≥ 80%
.....	BG-1	Triturado	T _{MAX} 37,5 mm, % Pasa #4 = 30 a 60%, Pasa # 200 = 5 a 15%, IP = ≤ 3 , Compactación 100% de Proctor Modificado.
.....	BG-2	Triturado	T _{MAX} 25 mm, % Pasa #4 = 35 a 65%, Pasa # 200 = 5 a 15%, IP = ≤ 3 , Compactación 100% de Proctor Modificado.
		Base estabilizada con emulsión asfáltica INV 340	Emulsión: CRL-1 ó CRL-1h Agua : Ph 5.5 a 8.0, SO ₄ ≤ 1 g/l Aditivos: INV 400 y 412
	BEE-1	Suelo grueso	T _{MAX} 37,5 mm, % Pasa #4 = 30 a 60%, Pasa # 200 = 3 a 15%, IP < 7, D ≤ 50%, Compactación 95% de Proctor Modificado.
	BEE-2	Suelo grueso	T _{MAX} 25 mm, % Pasa #4 = 30 a 60%, Pasa # 200 = 3 a 15%, IP < 7, D ≤ 50%, Compactación 95% de Proctor Modificado.
	BEE-3	A-1-b ó A-2-4	EA ≤ 90% A-1-b y 20 ≤ E.A. ≤ 40% A-2-4 T _{MAX} 4,75 mm, % Pasa #200 = 5 a 25%, CBR sin Estabilizar ≥ 15, IP ≤ 7 , Compactación 95% de Proctor Modificado
		Base estabilizada con cemento INV 341	Cemento Portland: NTC 121 y 321 Agua : Ph 5.5 a 8.0, SO ₄ ≤ 1 g/l Suelo : SO ₄ ≤ 0.5%
.....	BEC	Granular Grueso: A-1, A-2-4, A-2-5 ,A-3 Granular Fino: A-2-6, A-2-7, A-4, A-5 A-6, A-7	T _{MAX} ≤ 75 mm y < ½ del espesor de la capa compactada Pasa #4 ≥ 50%, Pasa #200 ≤ 50% LL ≤ 35, IP < 15, % en peso de SO ₄ ≤ 0,5.
		Mezcla densa en frío INV 440	Emulsión: CRL-1 ó CRL-1h Agua : Ph 5.5 a 8.0, SO ₄ ≤ 1 g/l Agregado: Tr ≥ 75%, D ≤ 40%Base, D _c 30%Rodadura, P ≤ 12%- 18%, R _c ≥ 75%, I _a ≤ 35%, Coef.P ≥ 0.45, EA ≥ 50%, NP
	MDF-1	Triturado	T _{MAX} 37,5 mm, % Pasa # 4 = 45 a 60, % Pasa # 200 = 3 a 8
	MDF-2	Triturado	T _{MAX} 25 mm, % Pasa # 4 = 47 a 62 , % Pasa # 200 = 3 a 8
	MDF-3	Triturado	T _{MAX} 19 mm, % Pasa # 4 = 50 a 65 , % Pasa # 200 = 3 a 8
		Mezcla densa en caliente INV 450	Cemento Asfáltico : 60 - 70 ó 80 - 100 Agregado: Tr ≥ 75%, D ≤ 40%Base, D _c 30%Rodadura, P ≤ 12%- 18%, R _c ≥ 75%, I _a ≤ 35%, Coef.P ≥ 0.45, EA ≥ 50%, NP
.....	MDC-1	Triturado	T _{MAX} 25 mm, % Pasa # 4 = 43 a 54 , % Pasa # 200 = 4 a 8
.....	MDC-2	Triturado	T _{MAX} 19 mm, % Pasa # 4 = 51 a 68, % Pasa # 200 = 4 a 8
.....	MDC-3	Triturado	T _{MAX} 9,5 mm, % Pasa # 4 = 65 a 87, % Pasa # 200 = 5 a 10

La metodología propone diferentes espesores estructurales para las diferentes combinaciones de las variables: número de ejes equivalentes acumulados de 8.2 t para el periodo de diseño, resistencia de la subrasante y condiciones climáticas.

Tabla 2.5. Regiones climáticas según temperatura y precipitación (INVIAS y Ministerio de Transporte de Colombia, 1998, p. 50).

CATEGORÍA (R)	REGIÓN	TEMPERATURA (TMAP) [°C]	PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL (PMA) [mm]
R1	Fría seca y fría semihúmeda	< 13	< 2000
R2	Templado seco y	13 a 20	< 2000

Título: Análisis por confiabilidad del modelo de diseño AASHTO-93 para pavimentos flexibles en el Valle de Aburra.

	templado semihúmedo		
R3	Cálido seco y cálido semihúmedo	20 a 30	< 2000
R4	Templado húmedo	13 a 20	2000 a 4000
R5	Cálido húmedo	20 a 30	2000 a 4000
R6	Cálido muy húmedo	20 a 30	> 4000

Tabla 2.6. Entornos de la resistencia (INVIAS y Ministerio de Transporte de Colombia, 1998, p. 45).

CATEGORÍA (S)	INTERVALO MÓDULO RESILIENTE (Mr) [kg/cm ²]	INTERVALO CBR [%]
S1	300 a 500	$3 \leq \text{CBR} < 5$
S2	500 a 700	$5 \leq \text{CBR} < 7$
S3	700 a 1000	$7 \leq \text{CBR} < 10$
S4	1000 a 1500	$10 \leq \text{CBR} < 15$
S5	> 1500	$\text{CBR} \geq 15$

Tabla 2.7. Rangos de tránsito (INVIAS y Ministerio de Transporte de Colombia, 1998, p. 18).

CATEGORÍA (T)	RANGOS DE TRÁNSITO ACUMULADO POR CARRIL DE DISEÑO EN MILLONES (N) [EE _{8.2t.}]
T1	0.5 a 1.0
T2	1.0 a 2.0
T3	2.0 a 4.0
T4	4.0 a 6.0
T5	6.0 a 10.0
T6	10.0 a 15.0
T7	15.0 a 20.0
T8	20.0 a 30.0
T9	30.0 a 40.0

Finalmente, se obtienen seis (6) cartas de diseño.

Tabla 2.8. Rangos contemplados en las cartas de diseño (INVIAS y Ministerio de Transporte de Colombia, 1998, p. 72).

CARTA No.	REGIÓN CLIMÁTICA (R)	RESISTENCIA DE SUBRASANTE (S)	RANGO DE TRÁNSITO (T)	ESPEORES
1	R1	S1 a S5	T1 a T9	Variable
2	R2	S1 a S5	T1 a T9	Variable
3	R3	S1 a S5	T1 a T9	Variable
4	R4	S1 a S5	T1 a T9	Variable
5	R5	S1 a S5	T1 a T9	Variable
6	R6	S1 a S5	T1 a T9	Variable

2.2.3 Método de diseño analíticos, mecanistas o racionales

Consideran el estado de esfuerzos y deformación que experimentan las capas que conforman la estructura del pavimento e influyen en su comportamiento. Para el cálculo de los esfuerzos y deformaciones se emplean programas de computador disponibles desde la década de los sesenta. En estos programas se introducen la carga, la presión de contacto, las propiedades mecánicas de los materiales (por lo general el módulo resiliente y la relación de Poisson) y el espesor de las capas de pavimento con el fin de obtener los estados de esfuerzo y deformación. Una vez calculados estos estados, se comparan con aquellos que admite el pavimento para la vida útil proyectada, y en un procedimiento de ensayo y error (aumentando o disminuyendo por lo general los espesores de capas) se dimensionan las capas que conformarán la estructura de pavimento. Algunos de los programas son: ALIZE (LCPC, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées), ELSYM5 (ChevronOil), BISAR (Shell), KENLAYER (Universidad de Kentucky) y DEPAV (Universidad del Cauca) (Rondon & Reyes, 2015, p. 373 y 374).

Los valores admisibles de deformación a tracción y vertical en la fibra inferior de la capa y en la superficie de la subrasante, respectivamente, se obtienen de diversas ecuaciones desarrolladas en instituciones de investigaciones como *TRL*, *AASHTO* y *AI*.

2.2.3.1 Fatiga de las mezclas asfálticas.

Son las ecuaciones matemáticas utilizadas para predecir la respuesta a la fatiga que experimentan mezclas asfálticas in situ y en el laboratorio. Se concentran por lo general en relacionar principalmente el número de ciclos de falla que resiste la mezcla con la deformación o el esfuerzo aplicado, la rigidez y la composición volumétrica (Rondón et al., 2012).

Tabla 2.9. Modelos de predicción de la respuesta de las capas asfálticas de pavimento a la fatiga (Rondón et al., 2012, pp. 113–123).

MODELO	ECUACIÓN
(Asphalt Institute, 1982)	$N_f = 18.4 * C * (4.325 * 10^{-3} * \epsilon_t^{-3.291}) * E * ^{0.854} \quad \text{Ecuación 2-18}$ $C = 10^M \quad \text{Ecuación 2-19}$ $M = 4.84 * \left(\frac{V_b}{V_b + V_a} - 0.69 \right) \quad \text{Ecuación 2-20}$ <p>Donde,</p> <p>N_f Es el número de ejes equivalentes admisibles de la carpeta asfáltica [EE_{8.2t}].</p> <p>C Es una constante definida por las características de la mezcla.</p> <p>ϵ_t Es la deformación unitaria a tracción calculada para la estructura evaluada.</p> <p>E Es el módulo dinámico de la carpeta asfáltica [psi].</p> <p>M Relación entre el volumen de asfalto y el volumen de aire de la mezcla desarrollada por Pell y Cooper (1975).</p> <p>V_b Es el volumen de asfalto de la mezcla asfáltica [%].</p> <p>V_a Es el volumen de aire de la mezcla asfáltica [%].</p>
(Shell International Petroleum Company, 1978)	$N_f = 4.91 * 10^{-13} * (0.86 * V_b + 1.08)^5 * \left(\frac{1}{\epsilon_t} \right)^5 * \left(\frac{1}{E} \right)^{1.8} \quad \text{Ecuación 2-21}$ <p>Donde,</p> <p>N_f Es el número de ejes equivalentes admisibles de la carpeta asfáltica [EE_{8.2t}].</p> <p>ϵ_t Es la deformación unitaria a tracción calculada para la estructura evaluada.</p> <p>E Es el módulo dinámico de la carpeta asfáltica [ksi].</p> <p>V_b Es el volumen de asfalto de la mezcla asfáltica [%].</p>
Ecuación utilizada en Bélgica	$N_f = 4.92 * 10^{-14} * \left(\frac{1}{\epsilon_t} \right)^{4.76} \quad \text{Ecuación 2-22}$ <p>Donde,</p> <p>N_f Es el número de ejes equivalentes admisibles de la carpeta asfáltica [EE_{8.2t}].</p> <p>ϵ_t Es la deformación unitaria a tracción calculada para la estructura evaluada.</p>
Dirección Nacional de Caminos de	$N_f = 2.94 * 10^6 * V_b^{5.62} \left(\frac{1}{\epsilon_t} \right)^{5.62} \quad \text{Ecuación 2-23}$

Título: Análisis por confiabilidad del modelo de diseño AASHTO-93 para pavimentos flexibles en el Valle de Aburra.

Dinamarca (Ullidtz, 1977)	<p>Donde,</p> <p>N_f Es el número de ejes equivalentes admisibles de la carpeta asfáltica [EE_{8.2t}].</p> <p>ϵ_t Es la deformación unitaria a tracción calculada para la estructura evaluada.</p> <p>V_b Es el volumen de asfalto de la mezcla asfáltica [%].</p>
Noruega (Myre, 1992)	<p>$\log(N_f) = 34.5326 - 6.1447 * \log(\epsilon_t) - 3.395 * \log(E) + 0.3864 * \log(V_b * MF) - 0.0788$ Ecuación 2-24</p> <p>$MF = 1.99 - 3.37 * \frac{A}{B} - 0.00342 * B + 0.004 * A + 0.00153 * E$ Ecuación 2-25</p> <p>$A = \sum_{i=1}^{i=n} (h_i * \sqrt[3]{E_i})$ Ecuación 2-26</p> <p>$B = \sum_{i=1}^{i=m} (h_i * \sqrt[3]{E_i})$ Ecuación 2-27</p> <p>Donde,</p> <p>N_f Es el número de ejes equivalentes admisibles de la carpeta asfáltica [EE_{8.2t}].</p> <p>ϵ_t Es la deformación unitaria a tracción calculada para la estructura evaluada.</p> <p>E Es el módulo de rigidez de la subrasante [MPa].</p> <p>V_b Es el volumen de asfalto de la mezcla asfáltica [%].</p> <p>h_i Es el espesor de la capa número i [cm].</p> <p>E_i Es el módulo de rigidez de la capa número i [MPa].</p>
Modelo PDMAP – NCHRP (Monismith, Epps, Kasianchuk, & McLean, 1970)	<p>$\log(N_f) = 14.82 - 3.291 * \log\left(\frac{\epsilon_t}{10^{-6}}\right) - 0.854 * \log\left(\frac{E^*}{10^3}\right)$ Ecuación 2-28</p> <p>Donde,</p> <p>N_f Es el número de ejes equivalentes admisibles de la carpeta asfáltica [EE_{8.2t}].</p> <p>ϵ_t Es la deformación unitaria a tracción calculada para la estructura evaluada.</p> <p>E Es el módulo de rigidez de la subrasante [psi].</p>

2.2.3.2 Deformación del suelo

El Instituto Norteamericano del Asfalto (INA) establece el límite denominado deformación elástica ϵ_z (o esfuerzo vertical admisible) para un suelo, en las calzadas flexibles, según la **Ecuación 2-29** (tomado de Rondon y Reyes (2015, p. 561)).

$$\epsilon_z = 0.012 * N^{-0.222}$$

Ecuación 2-29

Donde,

- ϵ_z Es la deformación unitaria vertical calculada para la estructura evaluada.
- N Es el número de ejes equivalentes admisibles de la carpeta asfáltica [EE_{8.2t}].

2.2.4 Guía de diseño mecánico empírico de pavimentos (MEPDG)

Corresponde a la actualización de la *metodología AASHTO-93*. Básicamente, el método de diseño calcula la respuesta del pavimento (esfuerzos, deformaciones unitarias y deflexiones) involucrando las cargas de tráfico y las condiciones medio ambientales; obtiene la acumulación de daño a través del tiempo y las relaciona a fallas propias del pavimento (fisuramiento, ahuellamiento y falla) de forma empírica.

(Quiroga y Quiroz, 2012) propusieron el diagrama del flujo presentado en la *Figura 2-2*.

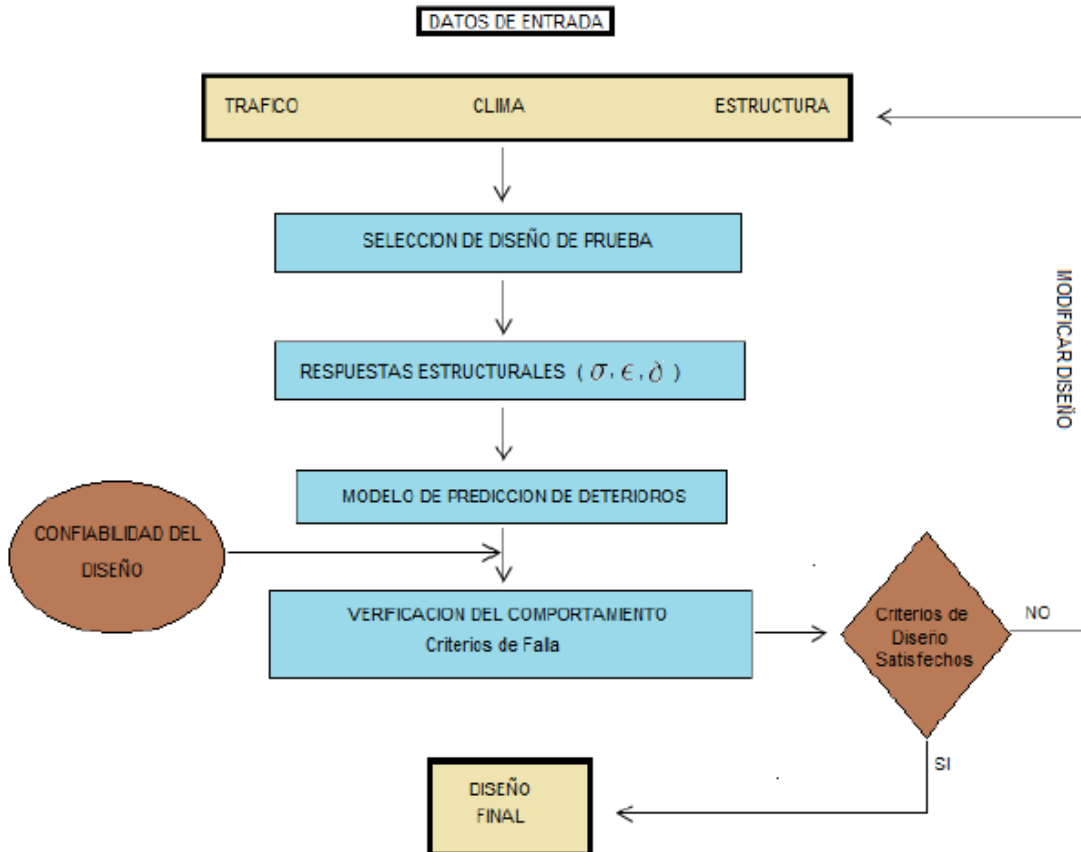


Figura 2-2. Diagrama de flujo de la MEPDG (tomado de Quiroga & Quiroz, 2012).

2.3 ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD EN PAVIMENTOS

Según Dilip et al. (2013), en los últimos años se ha pasado de la construcción de nuevas estructuras de pavimentos a los proyectos de gestión vial o, según el autor, modelos 4R: Restauración, reestructuración, rehabilitación y reconstrucción. Este cambio de paradigma tiene su origen en estudios que demuestran mayores retornos económicos de los proyectos de mantenimiento de pavimentos sobre la construcción de nuevas estructuras. De allí la importancia de garantizar que un pavimento diseñado preserve las condiciones requeridas en campo, siendo éste el origen de los análisis de confiabilidad.

El objetivo del análisis por confiabilidad, en el contexto de pavimentos, es proporcionar un grado específico de confianza donde el pavimento funcionará satisfactoriamente y soportará el número de diseño de aplicaciones de carga durante la vida útil deseada, preservando sus condiciones estructurales y funcionales (Dilip et al., 2013). Además, indica que el análisis de confiabilidad consiste en la evaluación de la función de desempeño, expresada como la relación entre las repeticiones de carga permitidas y las repeticiones de carga aplicadas durante un periodo de diseño específico. La falla del pavimento ocurre cuando el valor de dicha relación es igual o inferior a uno (1). Así, la probabilidad de ocurrencia de una falla estructural es cuantificable y el análisis de confiabilidad de una estructura consiste en la estimación de dicha probabilidad durante su vida útil.

Existen muchos factores que introducen variabilidad a la estimación de la confiabilidad, los cuales deben ser incorporadas sistemáticamente, para identificar sus efectos en el cálculo de la probabilidad de falla de la estructura. Las incertidumbres en los pavimentos se dividen entre los parámetros de diseño y los errores sistemáticos. Las incertidumbres por los parámetros de diseño representan la variación espacial y la variación de las propiedades de los materiales. Las incertidumbres por errores sistemáticos corresponden al sesgo del modelo en la predicción del desempeño del pavimento. El conocimiento de las incertidumbres asociadas a las distintas variables brinda al diseñador la oportunidad de evaluar la contribución de cada una a la variabilidad total del sistema, permitiendo identificar las variables más influyentes en el desempeño de la estructura de pavimento (Kim y Board, 2003)

La confiabilidad no es un concepto nuevo en el diseño de pavimentos. Particularmente, el modelo el *método AASHTO-93* involucra en sus cálculos el concepto de confiabilidad como la probabilidad de que una sección diseñada mediante dicha metodología se comportará satisfactoriamente bajo las condiciones de tránsito y ambientales durante el periodo de diseño; considerando variaciones al azar tanto en la predicción del tránsito como en la predicción del comportamiento de la estructura, proporcionando un nivel determinado de confianza (R) en que los tramos del pavimento soportarán el periodo de diseño (Montejo, 2006, p. 342). En la **Tabla 2.10** se presentan los siguientes niveles de confiabilidad (R) para los diseños de pavimentos por el *modelo AASHTO-93*.

Tabla 2.10. Confiabilidad recomendada para el diseño de pavimentos (AASHTO, 1993).

CLASIFICACIÓN FUNCIONAL	URBANO [%]	RURAL
Autopistas	85-99.9	80-99.9

CLASIFICACIÓN FUNCIONAL	URBANO [%]	RURAL
Arterias principales	80-99	75-99
Colectoras	80-95	75-95
Locales	50-80	50-80

Adicionalmente, el método AASHTO-93 relaciona la confiabilidad con un factor de seguridad (FS) asociado a una desviación normal estándar de la confianza (Z_r) y a un error estándar combinado. Éste último conjuga la desviación estándar de la ley de predicción del tránsito en el periodo de diseño con la ley de predicción del comportamiento del pavimento (S_o).

$$FS_{AASHTO\ 93} = 10^{-Z_r * S_o}$$

Ecuación 2-30

Algunos valores típicos del factor de seguridad obtenido con el método AASHTO-93 se presentan en la siguiente tabla (tomado de Montejo Fonseca (2006, p. 473)).

Tabla 2.11. Confiabilidad y factor de seguridad (AASHTO, 1993).

TRÁNSITO ESPERADO EN EL CARRIL DE DISEÑO (MILLONES DE EJES EQUIVALENTES)	NIVEL DE CONFIABILIDAD R [%]	FACTOR Z_r	FACTOR S_o	F.S.
<5	50	0.000	0.35	1.00
5 a 15	50 - 60	0.000 - 0.253	0.35	1.00 – 1.23
15 a 30	60 – 70	0.253 – 0.524	0.35	1.23 – 1.83
30 a 50	70 – 75	0.524 – 0.674	0.34	1.51 – 1.70
50 a 70	75 – 80	0.674 – 0.841	0.32	1.64 – 1.86
70 a 90	80 - 85	0.841 – 1.037	0.30	1.79 – 2.05

Igualmente, los diseños pueden realizarse basados en las probabilidades de falla admisibles o aceptables (p_f). Luo et al. (2014) propusieron el modelo de la *Figura 2-3*, con base en la *Ecuación 2-31*. Dicho modelo corresponde a un diseño controlado por fatiga, definido como la probabilidad que la vida útil por fatiga sea menor que el límite de falla del pavimento. Esta probabilidad de falla debe cumplir un límite o requerimiento mínimo de diseño.

$$p_f = 1 - R$$

Ecuación 2-31

Donde,

p_f es la probabilidad de falla admisible.

R es la probabilidad que el elemento no falle bajo un límite específico definido

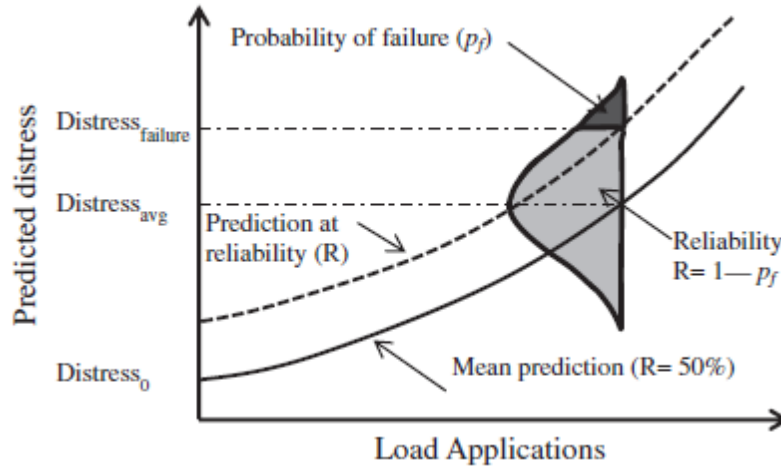


Figura 2-3. Concepto de confiabilidad en el diseño de pavimentos (figura modificada de Luo et al., 2014).

Ante la condición del *método AASHTO-93* de considerar la confiabilidad como una variable determinística en el diseño, Rodríguez et al. (2016) incorporaron la probabilidad en la estimación del ciclo de vida de una estructura de pavimento diseñada con el *modelo AASHTO-93* mediante funciones de probabilidad (o variables aleatorias) del número estructural (SN) y el módulo resiliente de la subrasante, empleando el *Modelo de Monte Carlo*. El modelo conceptual definido se presenta en la **Figura 2-4**.

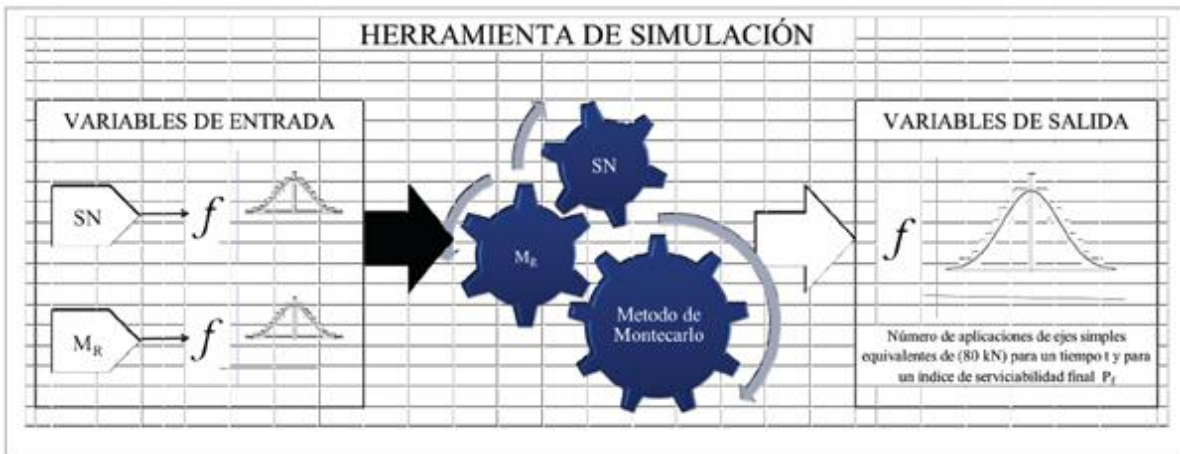


Figura 2-4. Ejecución del modelo de simulación (Rodríguez et al., 2016).

La evolución del *método AASHTO-93* al *Modelo MEPDG* ha traído consigo un grado de dificultad mayor en la implementación del concepto de confiabilidad en el método, pues los enfoques que la estiman son aún insuficientes. Por ello, muchos investigadores han dirigido sus esfuerzos en enmarcar la condición de la confiabilidad del método, adoptando distintos modelos de análisis disponibles como: el método de confiabilidad de primer orden (FORM) el método de segundo momento de primer orden (FOSM), la simulación Monte Carlo, entre otros (Luo et al., 2014).

2.4 FUNCIÓN DE PROBABILIDAD DEL MÓDULO RESILIENTE DE LA SUBRASANTE

Con el fin de determinar la función de probabilidad del módulo resiliente de la subrasante, Baecher y Christian (2003) sugieren implementar, para la geotecnia, el método Bayesiano, el cual consiste en relacionar el comportamiento de un evento observado en campo con las predicciones realizadas en los modelos y ecuaciones. El método Bayesiano trata la incertidumbre con algún grado de confiabilidad, por lo que admite establecer probabilidades de suceso del mismo. Este método, define que los estados de la naturaleza son variables y no constantes desconocidas (Baecher y Christian, 2003).

Con base en lo señalado, la distribución de probabilidad de una variable aleatoria, es una función que asigna a cada suceso definido en el histograma de frecuencias la probabilidad de suceso de esta, tal cual lo ilustrado en la *Figura 2-5*.

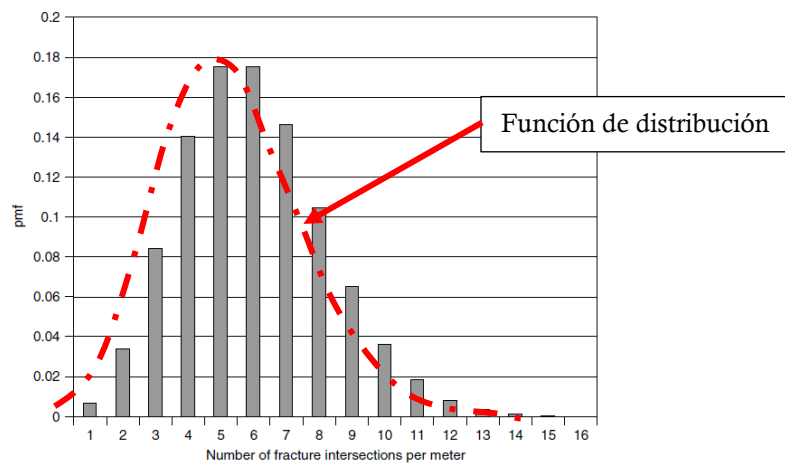


Figura 2-5. Ejemplo de función de distribución al histograma de frecuencias (tomado de Baecher & Christian, 2003).

Para una muestra espacial, no tiene sentido hablar de una única probabilidad de suceso debido a la cantidad de datos que conforman la función de probabilidad, por lo que surge el concepto de probabilidad como un concepto de densidad de la función de distribución (Baecher y Christian, 2003).

La densidad de la muestra espacial, se define como el área bajo la curva de la función de probabilidad de densidad, la cual es definida por medio de una integral, tal cual la *Ecuación 2-32*.

$$P(A) = \int_A^B f_x(x) dx$$

Ecuación 2-32

Dependiendo de la tipología de los datos, puede ser complejo definir la función de probabilidad de la variable y por lo tanto la solución de la densidad de probabilidad, por lo que surgen las distintas plataformas estadísticas como R®, Statgraphics®, @Risk® (Palisade Corporation), entre otros; los cuales, apoyados en modelos matemáticos y de iteración, permiten definir de manera acertada estas funciones.

Para el proyecto, se trabajó con el aplicativo @Risk® debido al acoplamiento con Microsoft Excel®, la facilidad en la manipulación y control de los datos geotécnicos, el análisis de dispersión y su capacidad de manejo gráfico.

2.4.1 Determinación de la función de probabilidad.

La determinación del ajuste más adecuado del modelo probabilístico de falla, se realizará por medio del selector de jerarquización de ajuste del programa @Risk®, el cual especifica la prueba de idoneidad del ajuste para clasificar las distribuciones; esta prueba de idoneidad se encarga de medir la exactitud con la que los datos muestrales se ajustan a una función de densidad de probabilidad hipotética (Palisade Corporation, 2013).

El Software implementa hasta cinco tipos de pruebas de idoneidad calculados a partir de la función log-probabilidad, que se encarga de considerar el número de parámetros libres de la distribución ajustada (Palisade Corporation, 2013).

La estadística del método Bayesiano se calcula con la función log-probabilidad, bajo la *Ecuación 2-33* (Palisade Corporation, 2013).

$$BIC = k \ln(n) - 2 \ln(L) \quad \text{Ecuación 2-33}$$

Donde,

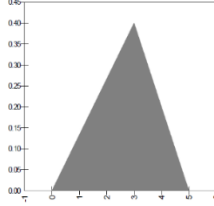
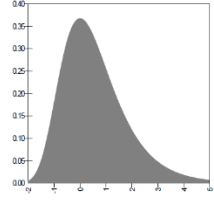
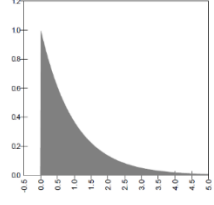
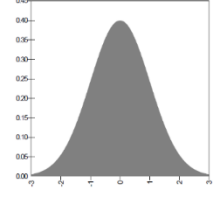
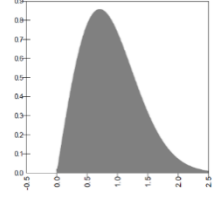
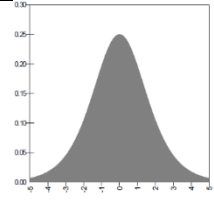
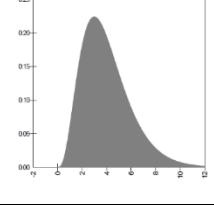
- L** Es la función de probabilidad.
- k** Es el número de parámetros estimados para el ajuste.
- n** Es el número de puntos muestreados.

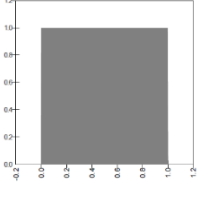
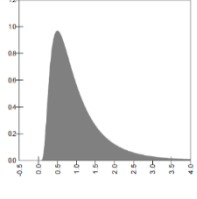
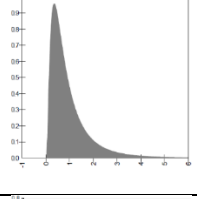
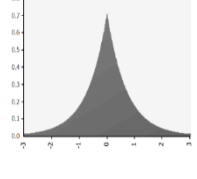
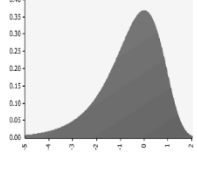
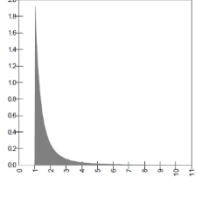
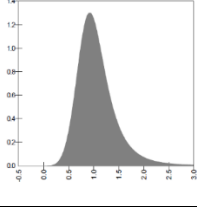
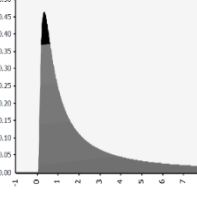
La función de probabilidad L para cualquier distribución de densidad $f(x)$ con parámetros α , y un grupo correspondiente de n valores de muestra X_i , se presenta a continuación (Palisade Corporation, 2013).

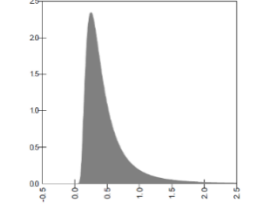
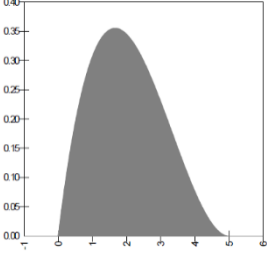
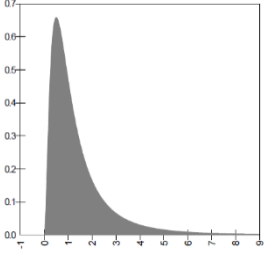
$$L = \prod_{i=1}^n f(X_i, \alpha) \quad \text{Ecuación 2-34}$$

Las funciones de distribución probabilística presentes en el software @Risk® se presentan en la *Tabla 2.12*.

Tabla 2.12. Funciones de distribución más utilizadas en @Risk® (Datos recopilados de la Guía para el uso de @Risk (Palisade Corporation, 2013))*.

FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN	DESCRIPCIÓN	ESQUEMA
Triang	Distribución triangular, con los valores mínimo, más probable y máximo definidos.	
ExtValue	Distribución de valores extremos (o Gumbel), con parámetros de localización alfa y parámetros de escala beta.	
Expon	Distribución exponencial, con constante de declinación beta.	
Normal	Distribución normal, con media y desviación estándar especificadas.	
Weibull	Distribución Weibull, con parámetro de forma alfa y parámetro de escala beta.	
Logistic	Distribución logística, con parámetro de localización alfa y parámetro de escala beta.	
Gamma	Distribución gamma, con parámetro de forma alfa y parámetro de escala beta.	

FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN	DESCRIPCIÓN	ESQUEMA
Uniform	Distribución uniforme, entre un mínimo y un máximo.	
InvGauss	Distribución de Gauss inversa (o de Wald), con media μ y parámetro de forma λ .	
Lognorm	Distribución log-normal, con media y desviación estándar especificadas.	
Laplace	Distribución Laplace, con la localización μ introducida y parámetros de escala σ .	
ExtValueMin	Distribución de valor extremo mínimo, con parámetros de localización alfa y parámetro de perfil beta.	
Pareto	Distribución Pareto.	
LogLogistic	Distribución log-logística, con parámetro de localización gamma, parámetro de escala beta y parámetro de forma alfa.	
Levy	Distribución Levy, con la localización a introducida y parámetro de escala continua c.	

FUNCIÓN DE DISTRIBUCIÓN	DESCRIPCIÓN	ESQUEMA
Pearson5	Distribución Pearson tipo V (o gamma inversa), con parámetro de forma alfa y parámetro de escala beta.	
BetaGeneral	Distribución beta, con mínimo y máximo y parámetros de forma alfa1 y alfa2.	
Pearson6	Distribución Pearson tipo VI, con parámetros de forma alfa1 y alfa2 y parámetro de escala beta.	

* Datos recopilados de la Guía para el uso de @Risk® (Palisade Corporation, 2013).

Mattos (2015) resumió varias funciones de probabilidad utilizadas para representar la variabilidad de las propiedades de los suelos.

Tabla 2.13. Funciones de probabilidad utilizadas en los diseños por confiabilidad en geotécnica, para representar la variabilidad de las propiedades de los suelos (Mattos, 2015).

Título: Análisis por confiabilidad del modelo de diseño AASHTO-93 para pavimentos flexibles en el Valle de Aburra.

Ángulo de fricción (ϕ)	Cohesión (c)	Peso unitario (Y)	Carga (R)*	Referencia
β Pert	β Pert	x	x	Recife (2001)
Normal, Lognormal, Beta, Gamma y Uniforme	x	Normal, LogNormal, Beta y Gamma	x	Baecher y Christian (2003)
Normal	Normal	Normal	x	Sivakumar y Srivastava (2007)
LogNormal	x	x	x	Cherubini et al., (2007)
Normal	x	Normal	x	Uzielli et al., (2007)
Normal y LogNormal	Normal y LogNormal	Normal y LogNormal	Gamma y Weibull	Phoon (2008)
x	Beta	x	x	Qingnian y Yuzhou (2011)
Normal	LogNormal	Normal	x	Prada et al., (2011)
Beta	x	Normal	x	Papaioannou y Straub (2012)
x	LogNormal	LogNormal	Gamma	Fan et al., (2013)
Normal	Normal	Normal	x	Wu (2013)

*Esta propiedad consta en la solicitud de esfuerzo o carga a la cual se ven sometidas las distintas obras geotécnicas.

Adicionalmente, algunos valores de media, desviación estándar y funciones de densidad, para las propiedades mecánicas y estructurales de los pavimentos, se presentan en la **Tabla 2.14** y la **Tabla 2.15**.

Tabla 2.14. Parámetros estadísticos de las variables de diseño (módulo elástico de la subrasante: E_3) (modificado de Dilip et al., 2013).

Parámetro	h_1 [cm]	h_2 [cm]	E_1 [MPa]	E_2 [Pa]	E_3 [MPa]	ws [cm]	T_p [MPa]
Media	20	45	1700	240	70	31	0.557
COV	7.5	10.5	10	20	20	0.129	3.75
Desviación estándar	1.5	4.725	170	48	15.4	0.04	0.021
Distribución	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal

Tabla 2.15. Funciones de densidad de probabilidad que caracterizaron la variable Módulo Resiliente (M_r) (tomado de Rodríguez, 2014).

Identificación de celda Factorial	Tipo de Distribución	Parámetros
CTANB	Lognormal Valor-P - 0,0125173	media = 9502,35
		desviación estándar = 3769,91
NTANM	Weibull Valor-P - 0,0185034	forma = 6,62308
		escala = 17197,8
CTANM	Lognormal Valor-P - 0,00000157636	media = 21419,6
		desviación estándar = 5186,47
STANM	Lognormal Valor-P - 0,000361062	media = 12749,3
		desviación estándar = 2021,67
NTANA	El valor del Módulo Resiliente de la subrasante es constante	
CTANA	Lognormal Valor-P - 0,00190634	media = 16475,0
		desviación estándar = 3056,1
STANA	Lognormal Valor-P - 0,000311974	media = 19236,4
		desviación estándar = 12659,2
CTMNB	Lognormal Valor-P - 0,00468931	media = 16491,5
		desviación estándar = 5206,57
NTMNM	Normal Valor-P - 0,00000417546	media = 19109,2
		desviación estándar = 2068,98
STMNM	Lognormal Valor-P - 0,0000122598	media = 15766,8
		desviación estándar = 1882,09
NTMNA	Normal Valor-P - 0,00000199918	media = 18731,0
		desviación estándar = 2097,55
STMNA	Normal Valor-P - 0,00880689	media = 15432,5
		desviación estándar = 1244,71
CTBNM	Lognormal Valor-P - 0,0284617	media = 17673,7
		desviación estándar = 2823,47
STBNM	El valor del Módulo Resiliente de la subrasante es constante	

2.4.2 Coefficiente de Variación.

El coeficiente de variación (CV) de una muestra se define como la desviación estándar dividida por la media, y expresa la dispersión relativa de los datos (Baecher y Christian, 2003; Montgomery y Runger, 2002).

$$Cv = \frac{S}{\bar{\varphi}'} * 100$$

Ecuación 2-35

Donde,

$\bar{\varphi}'$ Es la media o promedio de los datos.

S Es la desviación estándar.

El coeficiente de variación es muy útil cuando se pretende la comparación de la incertidumbre de dos o más conjuntos de datos, los cuales difieren de manera considerable en la magnitud de la observación (Montgomery y Runger, 2002).

Según Phoon y Kulhawy (1999), la mayoría de coeficientes de variación reportados en la literatura geotécnica está basados en los análisis de variabilidad total, pero este coeficiente puede ser considerablemente más grande que la variabilidad inherente real del suelo, debido a cuatro problemas potenciales:

- **Datos del suelo de diferentes unidades geológicas que estén mezclados:** esto se mitiga realizando una clasificación apropiada de la geología.
- **Controles insuficientes sobre los equipos y procedimientos:** la documentación en los procedimientos de control durante las pruebas geotécnicas no son lo suficientemente detalladas para permitir la evaluación cuantitativa de la evaluación de los errores de medida.
- **Tendencias determinísticas del suelo:** algunas de las propiedades geotécnicas utilizadas para determinar la variabilidad provienen de valores uniformes o determinísticos.
- **Los datos de los suelos son obtenidos en largos periodos de tiempo:** la mayoría de estudios no reportan el tiempo en el que obtuvieron los datos del suelo. Sin embargo, debido a las condiciones del tiempo geológico, no es posible determinar si el cambio del tiempo en las realizaciones de las pruebas afecta las propiedades del suelo.

Viviescas (2016) reportó varios coeficientes de variación de propiedades geotécnicas del suelo obtenidas en su investigación en el Valle de Aburra y, adicionalmente, por otros autores a nivel internacional.

Título: Análisis por confiabilidad del modelo de diseño AASHTO-93 para pavimentos flexibles en el Valle de Aburrá.

Tabla 2.16. Resumen de propiedades índices de suelos en el Valle de Aburrá (tomado de Viviescas, 2016, p. 74).

MANTO		LL(%)	LP(%)	IP (%)	W(%)	γh g/cm3	Gs	Saturacion (%)	U.S.C
FLUJO DEL POBLADO	PROMEDIO	61,9	41,7	20,1	49,2	1,65	2,72	90,2	MH
	Cv(%)	18	18	30	24	3	5	6	
STOCK SAN DIEGO IC	PROMEDIO	46	31	16	28	1,79	2,67	82	ML
	Cv(%)	25	21	40	35	4	1	14	
STOCK SAN DIEGO 2A	PROMEDIO	38,7	25,1	13,6	23,3	1,80	2,70	84,14	SC
	Cv(%)	30	26	44	43	5	3	11	
FLUJO DE LA CEJA	PROMEDIO	56,5	37,3	19,1	45,5	1,70	2,54	89,4	MH
	Cv(%)	15	19	23	35	3	6	9	
STOCK ALTAVISTA IC	PROMEDIO	39,38	26,91	12,47	25,87	1,75	2,61	81,00	ML
	Cv(%)	25	16	49	41	4	2	10	
STOCK ALTAVISTA 2A	PROMEDIO	37,29	25,75	11,53	23,66	1,76	2,68	67,00	ML
	Cv(%)	16	11	51	38	0	0	17	
STOCK ALTAVISTA TODO	PROMEDIO	38,37	26,35	12,02	24,64	1,76	2,64	75,00	ML
	Cv(%)	21	14	49	39	3	2	15	

Tabla 2.17. Resumen propiedades de depuración y ajuste del N₆₀ para todos los mantos evaluados (tomado de Viviescas, 2016, p. 86).

Manto	Metodo de cluster	# Cluster	% Eliminacion	Cv(%)	Funcion ajustada	Asimetria	Curtosis	Características principales
	Average	4	9	51	Weibull	1,03	4,26	Los puntos eliminados se encuentran en cualquier profundidad.
Flujo de lodos intermedio Sector El Poblado	K-Medias	5	16	50	Weibull	1,02	4,23	
	Complete	3	8	47	ExtValue	1,21	4,56	Los puntos eliminados se encuentran en el fondo de la profundidad analizada.
Flujo de lodos maduro Sector La Ceja	Average	3	7	47	ExtValue	1,14	5,4	
	Single - Average	5 - 3	4	38	Normal	0	3	Los puntos eliminados se encuentran principalmente en el fondo de la profundidad analizada
Residual IC Stock de San Diego	K-Medias	3	12	33	Normal	0	3	
	Average - Ward	3	18	52	LogNorm	1,6	8,09	Los puntos eliminados se encuentran del medio hasta el fondo de la profundidad analizada
Residual IC Stock de AltaVista	K-Medias	3	16	52	LogNorm	1,68	8,43	
	Single	5	4	46	Weibull	0,79	3,58	Los puntos eliminados se encuentran desde medio hasta el fondo de la profundidad analizada.
Residual 2A Stock de San Diego	Average	3	7	43	BetaGral	0,29	2,25	
	Average	3	6	45	Normal	0	3	Los puntos eliminados se encuentran en el medio de la profundidad analizada.
Residual 2A Stock de AltaVista	K-Medias	3	16	43	Normal	0	3	

Título: Análisis por confiabilidad del modelo de diseño AASHTO-93 para pavimentos flexibles en el Valle de Aburra.

Tabla 2.18. Resumen de la variabilidad inherente de las propiedades de resistencia (Phoon et al., 1995).

Propiedad ^a	Tipo de suelo	No. De datos de grupo	No. De prueba por grupo		Valor de la propiedad		Propiedad de Cv (%)	
			Rango	Media	Rango	Media	Rango	Media
S_u (UC) (kN/m ²)	Grano Fino	38	2-538	101	6-412	100	6-56	33
S_u (UU) (kN/m ²)	Arcilla, limo	13	14-82	33	15-363	276	11-49	22
S_u (CIUC) (kN/m ²)	Arcilla	10	12-86	47	130-713	405	18-42	32
S_u (kN/m ²) ^b	Arcilla	42	24-124	48	8-638	112	6-80	32
ϕ' (°)	Arena	7	29-136	62	35-41	37.6	5-11	9
ϕ' (°)	Arcilla, limo	12	5-51	16	8-33	15.3	10-50	21
ϕ' (°)	Arcilla, limo	9	-	-	17-41	33.3	4-12	9
$\tan \phi'$ (TC)	Arcilla, limo	4	-	-	0.24-0.69	0.509	6-46	20
$\tan \phi'$ (DS)	Arcilla, limo	3	-	-	-	0.615	6-46	23
$\tan \phi'$ ^b	Arena	13	6-11	45	0.65-0.92	0.744	5-14	9

^a S_u , resistencia al corte no drenada; ϕ' , ángulo de fricción efectivo; TC, ensayo de compresión Triaxial; UC, ensayo de compresión no confinado; UU, ensayo de compresión Triaxial no drenada no consolidada; CIUC, ensayo de compresión Triaxial isotrópico consolidado no drenado; DS, ensayo de corte directo; Cv, Coeficiente de variación.

^bTipo de prueba de laboratorio no informada.

Tabla 2.19. Resumen de la variabilidad inherente del terreno según ensayo (Phoon et al., 1995).

Tipo de ensayo ^a	Propiedad ^b	Tipo de suelo	No. De datos de grupo	No. De prueba por grupo		Valor de la propiedad		Propiedad de Cv (%)	
				Rango	Media	Rango	Media	Rango	Media
CPT	q_c (MN/m ²)	Arena	57	10-2039	115	0.4-29.2	4.10	10-81	38
CPT	q_c (MN/m ²)	Arcilla limosa	12	30-53	43	0.5-2.1	1.59	5-40	27
CPT	q_r (MN/m ²)	Arcilla	9	-	-	0.4-2.6	1.32	2-17	8
VST	S_u (VST)	Arcilla	31	4-31	16	6-375	105	4-44	24
SPT	N	Arena	22	2-300	123	7-74	35	19-62	54
SPT	N	Arcilla, limo	2	2-61	32	7-63	32	37-57	44
DMT	A (kN/m ²)	Arena contra arena arcillosa	15	12-25	17	64-1335	512	20-53	33
DMT	A (kN/m ²)	Arcilla	13	10-20	17	119-455	358	12-32	20
DMT	B (kN/m ²)	Arena contra arena arcillosa	15	12-25	17	346-2435	1337	13-59	37
DMT	B (kN/m ²)	Arcilla	13	10-20	17	502-876	690	12-38	20
DMT	E_b (MN/m ²)	Arena contra arena arcillosa	15	10-25	15	9.4-46.1	25.4	9-92	50
DMT	E_b (MN/m ²)	Arena, limo	16	-	-	10.4-53.4	21.6	7-67	36
DMT	I_b	Arena contra arena arcillosa	15	10-25	15	0.8-8.4	2.85	16-130	53
DMT	I_b	Arena, limo	16	-	-	2.1-5.4	3.89	8-48	30
DMT	K_b	Arena contra arena arcillosa	15	10-25	15	1.9-28.3	15.1	20-99	44
DMT	K_b	Arena, limo	16	-	-	1.3-9.3	4.1	17-67	38
PMT	p_L (kN/m ²)	Arena	4	-	17	1617-3566	2284	23-50	40
PMT	p_L (kN/m ²)	Cohesivo	5	10-25	-	428-2779	1084	10-32	15
PMT	EPMT (MN/m ²)	Arena	4	-	-	5.2-15.6	8.97	28-68	42

^aCPT, ensayo de penetración con cono; VST, ensayo de veleta; SPT, ensayo de penetración estándar; DMT ensayo de dilatómetro; PMT, ensayo presiométrico.

^b q_c , CPT, Resistencia punta; q_r , resistencia punta CPT corregido; S_u (VST), resistencia al corte sin drenaje de VST; N, Número de golpes SPT (Número de golpes por pie o por 305 mm); A y B, Lecturas de DMT A y B; E_b , DMT módulo; I_b , DMT índice de materia; K_b , Índice de tensiones horizontal DMT; p_L , Estrés límite PMT; EPMT, PMT módulo

Tabla 2.20. Valores típicos de coeficientes de variación de las propiedades de los suelos (Uzielli et al., 2007).

Tipo de ensayo	Propiedad		Tipo de suelo	Media	COV (%)
	Nombre	Símbolo			
Ensayos triaxiales	Cohesión no drenada	S_u (UC)	Arcilla	1-40 kN/m ²	20-55
		S_u (UU)	Arcilla	1-35 kN/m ²	10-30
		S_u (CIUC)	Arcilla	15-70 kN/m ²	20-40
	Angulo de fricción	ϕ'	Arcilla y arena	20-40°	5-15
CPT	Resistencia en la punta	q_r	Arcilla	50-250 t/m ²	<20
	Resistencia en el fuste	q_c	Arcilla	50-200 t/m ²	20-40
			Arena	50-3000 t/m ²	20-60
VST	Cohesión no drenada	S_u (VST)	Arcilla	0,5-40 t/m ²	10-40
SPT	Numero de golpes	N	Arcilla y arena	10-70 golpes/pies	25-50
Ensayos de propiedades índice	Porcentaje de humedad	w_n	Arcilla y limo	13-100%	8-30
	Limite liquido	w_L	Arcilla y limo	30-90%	6-30
	Limite plástico	w_p	Arcilla y limo	15-25%	6-30
	Índice de plasticidad	I_p	Arcilla y limo	10-40%	-
	Índice de liquidez	I_L	Arcilla y limo	10%	-
	Peso unitario	γ	Arcilla y limo	1,3-2 t/m ³	<10
	Densidad relativa	D_R	Arena	30-70%	10-40 50-70
Ensayos de parámetros edométricos	Coefficiente de compresibilidad	C_c	No reportado	-	10-37
	Esfuerzo de pre consolidación	p'_c	No reportado	-	10-35
	Índice de pre consolidación	OCR	No reportado	-	10-36
No reportado	Coefficiente de permeabilidad	K	Arcillas saturadas	-	68-90
			Arcillas parcialmente saturadas	-	130-240
No reportado	Coefficiente de consolidación	C_v	No reportado	-	33-68
No reportado	Porosidad	n	Todo los tipos de suelos	-	7-30
	Relación de vacíos final	e		-	7-31
	Relación de vacíos inicial	e_0		-	7-32

2.5 MÉTODO MONTE CARLO

De acuerdo a Phoon (2008), en los modelos computacionales realizados con la simulación de Monte Carlo, las probabilidades de sucesos para los fenómenos aleatorios que se presentan en el suelo son escenificadas por medio de funciones teóricas. Estas funciones son definidas con base en ajustes de distribuciones muestrales (F.D.P), las cuales provienen de la recolección de información obtenida a partir de investigaciones de campo y ensayos de laboratorio. En las simulaciones la variable respuesta es determinada a través de la evaluación de varios escenarios que conducen a resultados que se encuentran dentro de un nivel esperado de confianza.

En la **Figura 2-6**. se ilustra por medio de un diagrama de flujo, un ejemplo de aplicación del método de Monte Carlo para el cálculo de los parámetros estadísticos de capacidad portante última de un suelo.

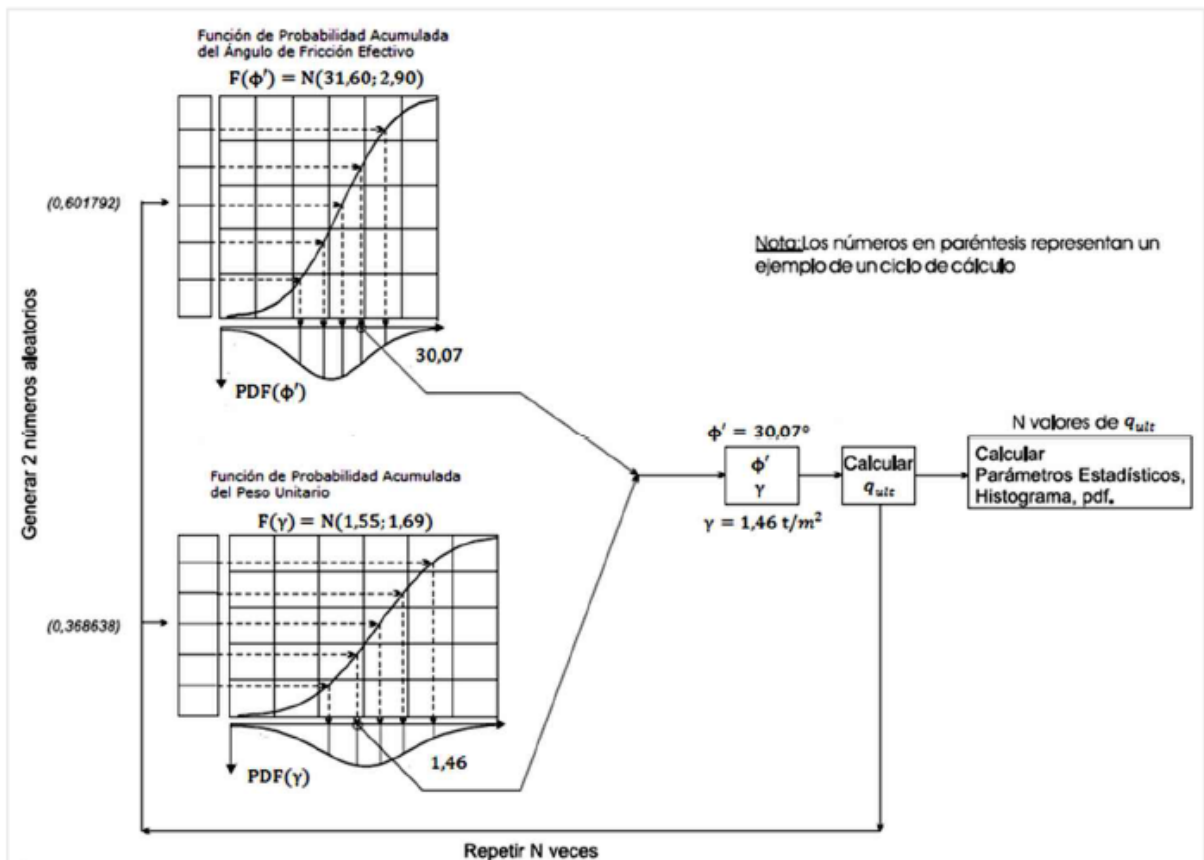


Figura 2-6. Diagrama de flujo representativo de la aplicación del método de Monte Carlo para el cálculo de los parámetros estadísticos de la capacidad portante última (Figura modificada a partir de (figura adaptado de Crespo, 2002)).

El proceso iterativo mediante el cual se obtienen los resultados probabilísticos se lleva a cabo de acuerdo al siguiente procedimiento:

1. Inicialmente, se definen las funciones de distribución de probabilidad que representan la variabilidad de los parámetros a evaluar.

2. Mediante un valor inicial aleatorio, se genera en la primera iteración un valor numérico para cada variable de entrada.
3. En las siguientes iteraciones se genera una secuencia de valores numéricos por medio de generadores de números pseudo-aleatorios. En cada iteración son generados nuevos valores para cada una de las funciones de entrada.
4. Los nuevos valores son evaluados en las funciones de probabilidad acumulada de cada variable, obteniendo cantidades que representan un escenario particular en el cálculo de la variable respuesta.
5. Las variables de ingreso se evalúan en las ecuaciones de la variable respuesta. Por iteración se obtiene como resultado un valor de la variable respuesta asociada con una probabilidad de ocurrencia asociada.
6. Finalmente, los resultados arrojados por la simulación de Monte Carlo se encuentran distribuidos alrededor de la media de la serie estadística. Los resultados pueden ser visualizados por medio de funciones de densidad de probabilidad, funciones de probabilidad acumulada y distribuciones de frecuencias.

2.6 INVESTIGACIONES PREVIAS

Existen investigaciones a nivel internacional en las que se implementaron metodologías para el desarrollo de modelos de distribución de probabilidad de las variables de diseño de pavimentos flexibles y rígidos, en los últimos años. Además, hay proyectos enfocados al análisis de confiabilidad para la predicción de la vida útil de las estructuras de pavimento empleando tanto modelos empíricos (Rodríguez, 2014) como racionales (Dilip et al., 2013; Hu et al, 2014; Thyagarajan et al, 2011, entre otros).

Se evidenciaron funciones de distribución de probabilidad para los parámetros mecánicos de los materiales y la condición de carga para el diseño de estructuras de pavimento. Particularmente, Kalita y Rajbongshi (2015) obtuvieron una función que relacionó la confiabilidad, el factor de seguridad y la covarianza de los factores de daño por fatiga y deformación, presentado en la *Figura 2-7*. Adicionalmente, Dilip et al. (2013) implementaron el método probabilístico formulado por el *Teorema de Bayes* e identificaron la sensibilidad de los parámetros de diseño.

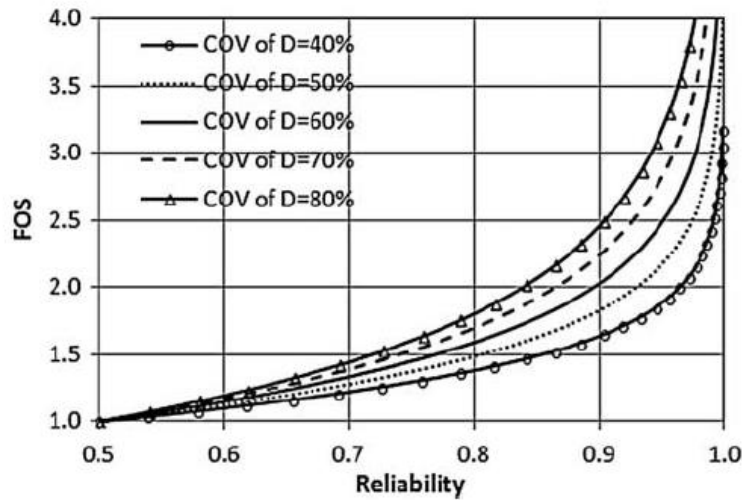


Figura 2-7. Factor de seguridad para diferentes niveles de confiabilidad de fatiga y deformación y covarianza de los factores de daño (tomado de Kalita y Rajbongshi, 2015).

Se han implementado procedimientos de cálculo de la probabilidad de falla de estructuras de pavimento flexible mediante la modelación del tránsito proyectado y admisible en función de las condiciones de fatiga y deformación admisibles establecidas en los *Diseño Mecánico Empírico de Pavimentos (MEPDG)*, empleando el *Método FORM* (Dilip et al., 2013), *Monte Carlo* (Dilip et al., 2013), *Rossenblueth $2n + 1$* (Hu et al., 2014) e *Hipercubo Latino* (Thyagarajan et al., 2011). Thyagarajan et al (2011) simplifican el análisis probabilístico de la vida útil del pavimento en el diagrama de flujo de la **Figura 2-8**.

Título: Análisis por confiabilidad del modelo de diseño AASHTO-93 para pavimentos flexibles en el Valle de Aburra.

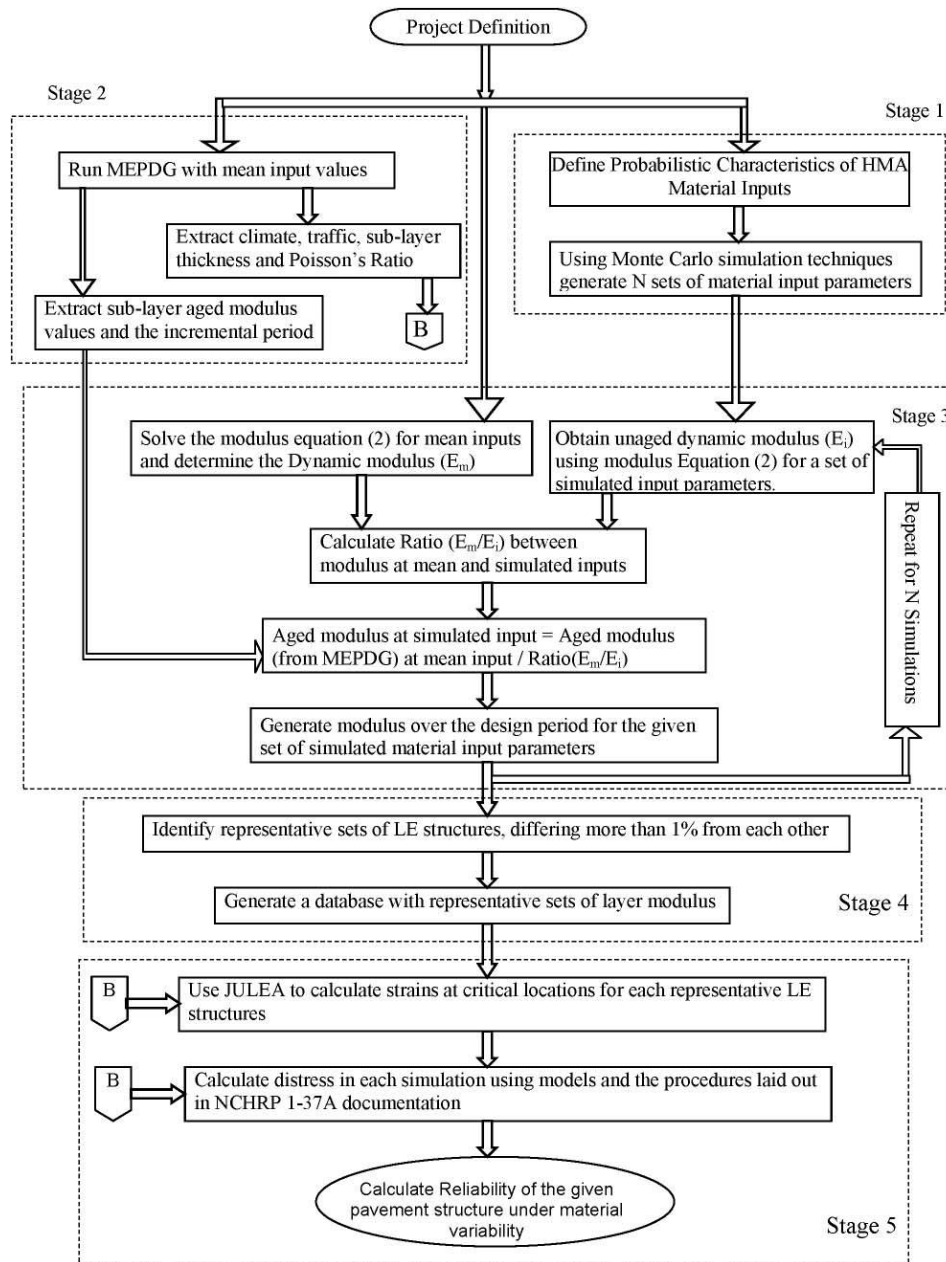


Figura 2-8. Procedimiento de análisis de confiabilidad para pavimentos flexibles (tomado de Thyagarajan et al., 2011).

Con base en la ejecución de modelos de probabilidad de falla en el diseño de la estructura, Dilip et al. (2013) concluyeron que las propiedades medias de los pavimentos disminuían con cargas muy altas (superiores a 150'000.000 de repeticiones) y que la falla estaba influenciada significativamente por los módulos elásticos de la capa base y la capa de rodadura. Al respecto, Luo et al. (2014) propusieron un modelo de propagación de la incertidumbre, en la **Figura 2-9**.

Título: Análisis por confiabilidad del modelo de diseño AASHTO-93 para pavimentos flexibles en el Valle de Aburra.

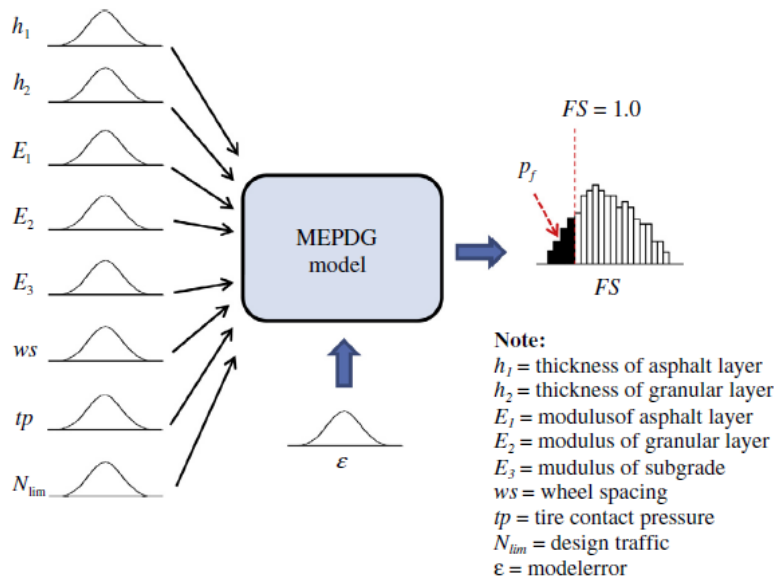


Figura 2-9. Propagación de la incertidumbre en el MEPDG (figura adaptada de Luo et al., 2014).

A nivel latinoamericano, Rodríguez et al. (2016) incorporaron la probabilidad en la estimación del ciclo de vida al modelo AASHTO-93, evaluando varias vías existentes en Chile, bajo el modelo conceptual de la Figura 2-10.

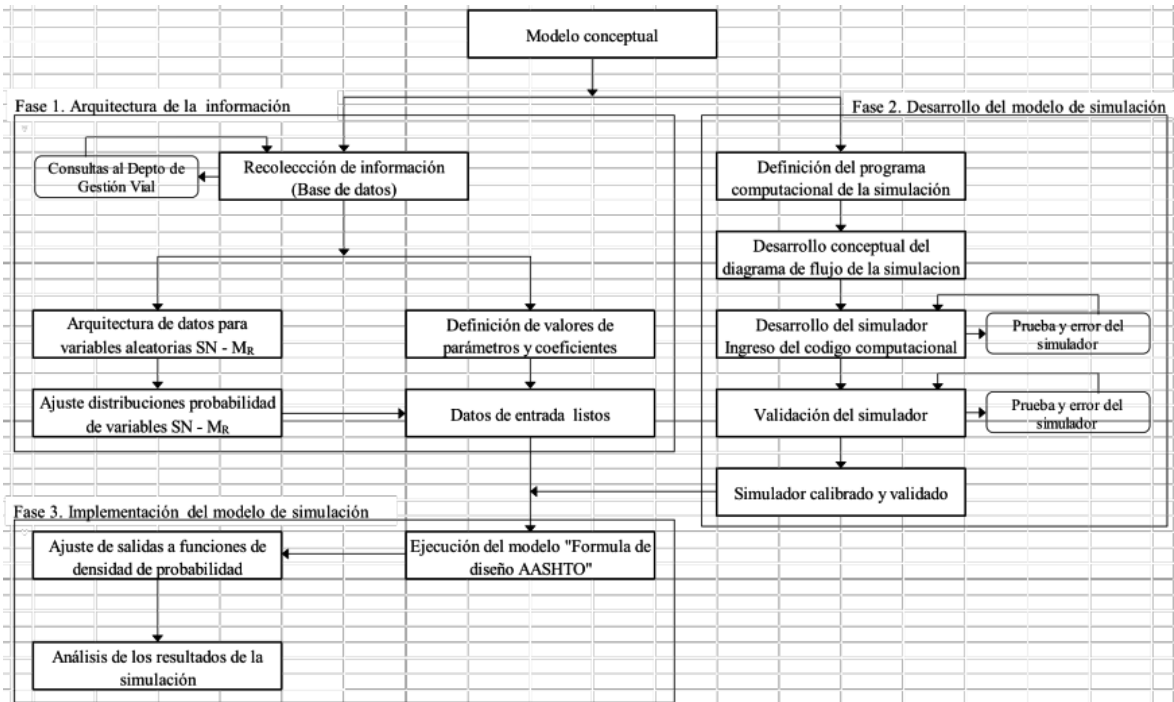


Figura 2-10. Modelo conceptual para el desarrollo del modelo de simulación (tomado de Rodríguez et al., 2016).

En Colombia, particularmente, no se evidenció la aplicación del análisis probabilístico de estructuras de pavimento en las investigaciones analizadas.

2.7 DISCUSIONES Y CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

- Las variables directas esenciales en el proceso de diseño de una estructura de pavimento son la carga asociada al tránsito y el comportamiento mecánico de la subrasante definida con el módulo resiliente del suelo. De allí la importancia del análisis probabilístico de la variabilidad del módulo resiliente.
- Si bien la calibración estadística de distintos métodos de diseño, en diversos tramos de estudio de pavimentos existentes colombianos, presentó una gran dispersión, se identificó que el *método AASHTO-93* correspondía al modelo más confiable asociado a las estructuras evaluadas. En consecuencia, los cálculos estructurales de la *metodología INVIAS 1998* (INVIAS y Ministerio de Transporte de Colombia, 1998), documento de diseño de pavimentos flexibles vigente en Colombia, están basados en el *método AASHTO 1993* (AASHTO, 1993).
- Las incertidumbres en los pavimentos están inducidas por la variabilidad espacial de las propiedades de los materiales y en el sesgo producido por los modelos de predicción de la falla de las estructuras. El objetivo del análisis de los pavimentos por métodos de probabilidad es obtener estructuras confiables que reduzcan la incidencia de dichas incertidumbres.
- Las funciones de distribución de probabilidad en geotecnia, se utilizan con el fin de determinar comportamientos mecánicos basados en la variabilidad de las propiedades. En la revisión bibliográfica se obtuvo que los tipos de funciones de densidad más reportados para describir las propiedades geotécnicas son: normal y log-normal.
- El coeficiente de variación permite comparar la magnitud e incidencia de la incertidumbre asociada a dos o más variables. Viviescas (2016) reportó CV entre 1% y 51% para propiedades índices y entre 33% y 52% para valores de N_{60} sobre suelos del Valle de Aburrá; Phoon et al. (1995) reportaron CV entre 5% y 80% para valores de resistencia del suelo y entre 2% y 130% para ensayos sobre el suelo; y Uzielli et al. (2007) reportó coeficiente entre 6% y 240% para diversas propiedades medidas. Finalmente, Rodríguez (2014) obtuvo CV del módulo resiliente entre 8% y 66% y Dilip et al. (2013) obtuvo CV entre 10% y 20% para la misma propiedad del suelo.

3 ZONA DE ESTUDIO Y VARIABLES DE DISEÑOS

Se presenta la descripción del Valle de Aburrá como el área que enmarca geográficamente el presente proyecto. Además, se calculan las variables determinísticas y probabilísticas correspondientes a los datos iniciales requeridos para modelar las funciones de probabilidad, con base en los parámetros establecidos por la *metodología INVIAS*.

3.1 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

Según A.M.V.A (2006, p. 2), el Valle de Aburrá es una región territorial del departamento de Antioquia (Colombia), conformada por los municipios de Medellín (como ciudad núcleo), Barbosa, Girardota, Copacabana, Bello, Envigado, Itagüí, La Estrella, Sabaneta y Caldas, conforme se presenta en la Figura 3-1. Se extiende desde el Alto de San Miguel (Municipio de Caldas) hasta el Municipio de Barbosa, en una longitud aproximada de 80 km. Estos diez municipios albergan una población cercana a 3'381.797 habitantes, equivalente al 8% de la población colombiana.

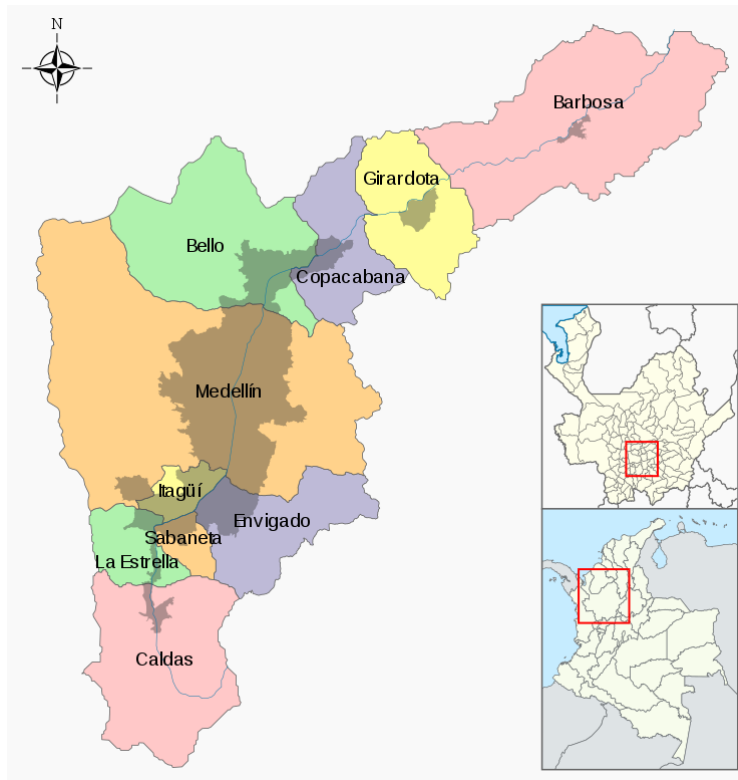


Figura 3-1. Localización del Valle de Aburrá.

Las condiciones paisajísticas del Valle de Aburrá están enmarcadas por un valle estrecho al sur, el cual se amplía en el municipio de Medellín alcanzando unos 7 Km de amplitud, y que luego se cierra nuevamente a la altura del municipio de Copacabana. Altimétricamente se presentan

variaciones en las montañas que rodean el valle, las cuales pueden alcanzar hasta los 3 000 m (A.M.V.A, 2006, p. 49).

A.M.V.A (2006 p. 49) encontró desde rocas paleozoicas hasta los depósitos cuaternarios. En cuanto a su origen y composición se tienen rocas metamórficas como esquistos, anfibolitas, migmatitas y gneises; rocas ígneas como granodioritas, dunitas, gabros y basaltos; rocas volcanosedimentarias y los depósitos de origen aluvial y de vertiente, además de los llenos de origen antrópico.

La temperatura media anual promedio (TMAP), precipitación media anual (PMA) y la altura promedio de cada municipio, del Valle de Aburrá, se presenta a continuación.

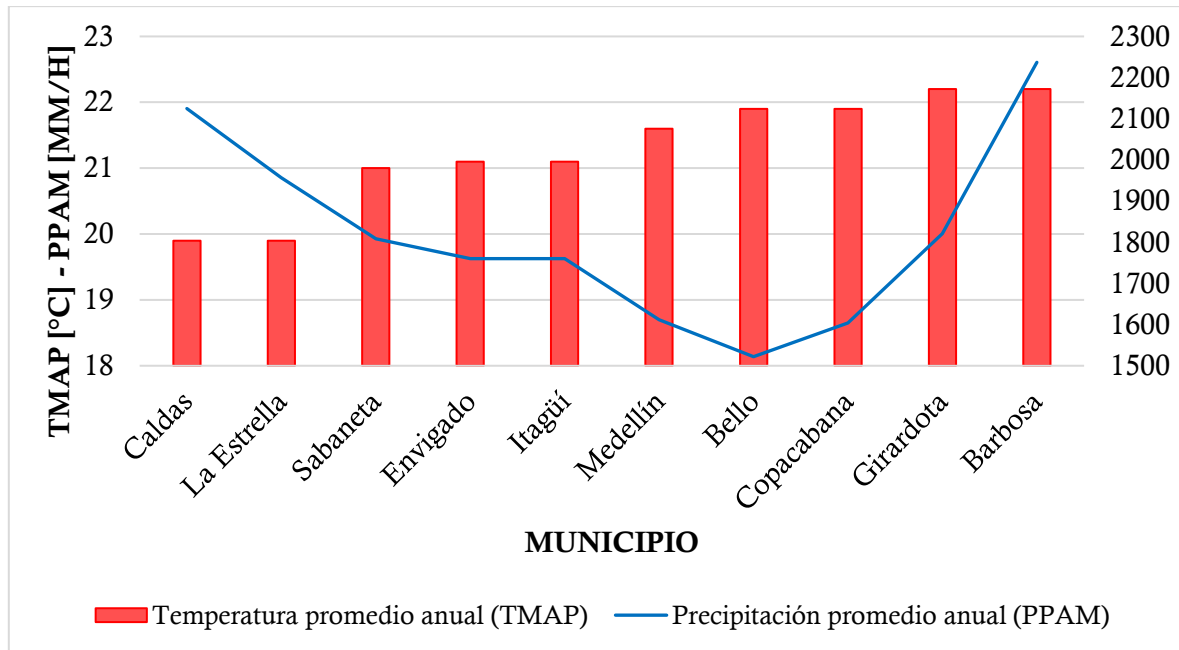


Figura 3-2. Temperatura y precipitación anuales promedio de los municipios del Valle de Aburrá (Fuente: CLIMATE-DATA.ORG (2018). Fecha de consulta: 21 de febrero de 2018).

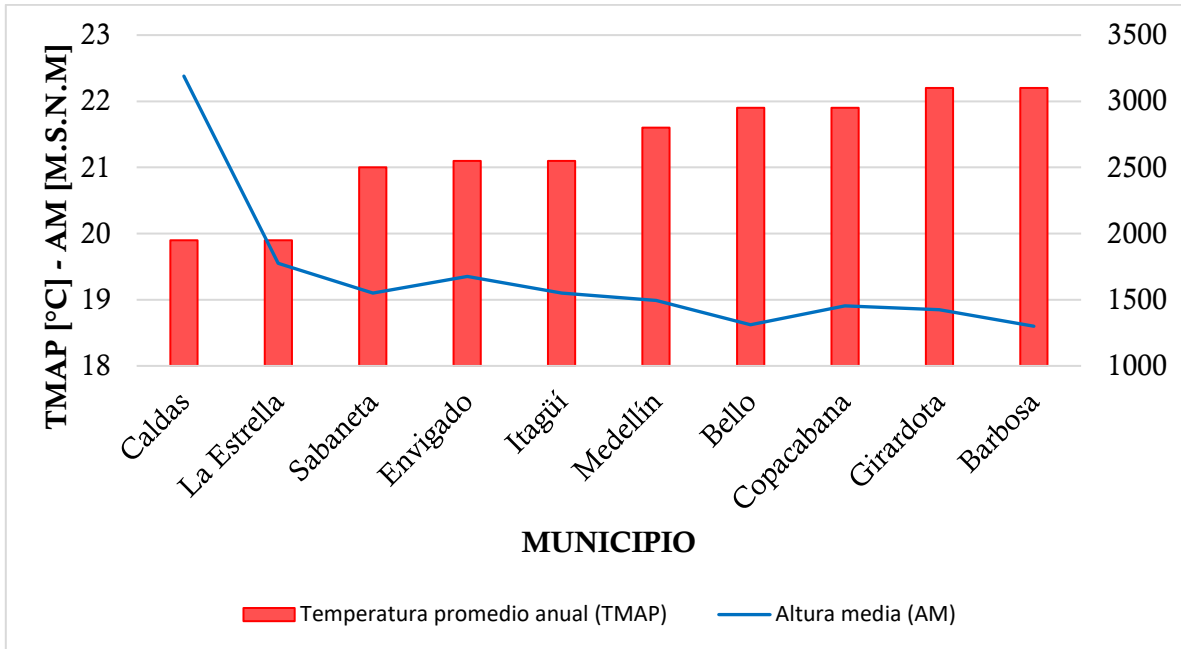


Figura 3-3. Temperatura anual y altura promedio de los municipios del Valle de Aburrá (Fuente: CLIMATE-DATA.ORG (2018). Fecha de consulta: 21 de febrero de 2018).

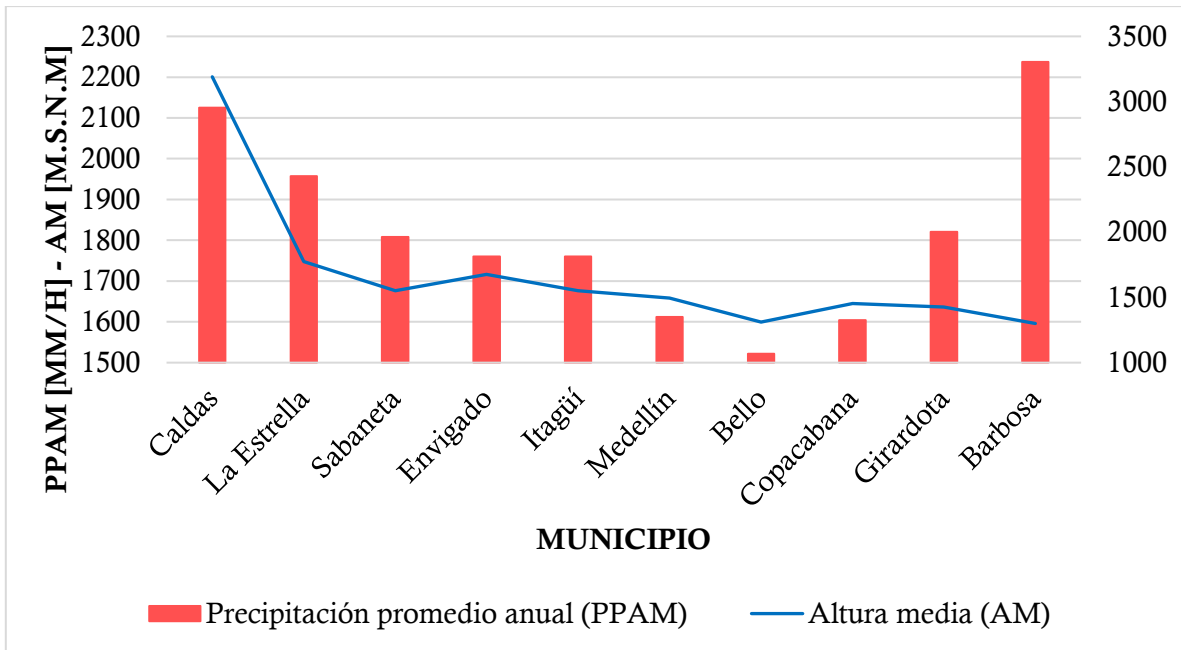


Figura 3-4. Precipitación anual y altura promedio de los municipios del Valle de Aburrá (Fuente: CLIMATE-DATA.ORG. Fecha de consulta: 21 de febrero de 2018).

3.2 REGIÓN CLIMÁTICA.

La **Figura 3-2** indica que las características de temperatura y precipitación de los municipios del Valle de Aburrá son significativamente variables. Por ello, se ejecutó un análisis de álgebra de mapas, empleando bases de datos de temperaturas y precipitaciones totales anuales promedio multianual en Colombia, durante el periodo comprendido entre los años 1981 y 2010, con herramientas ofimáticas tipo SIG (Sistemas de Información Geográfica). Las bases son de acceso gratuito y fueron suministradas por el Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones de Colombia (Ministerio de las TIC, 2018. Fecha de Consulta: 17 de noviembre de 2017).

En el análisis se obtuvo la distribución geográfica de las regiones climáticas de Colombia (**Figura 3-5**) y Antioquia (**Figura 3-6**), bajo las categorías establecidas por la *metodología INVIAS 1998*, configuradas en la **Tabla 2.5**. Adicionalmente, en la **Tabla 3.1** fueron reportadas las áreas enmarcadas para cada región.

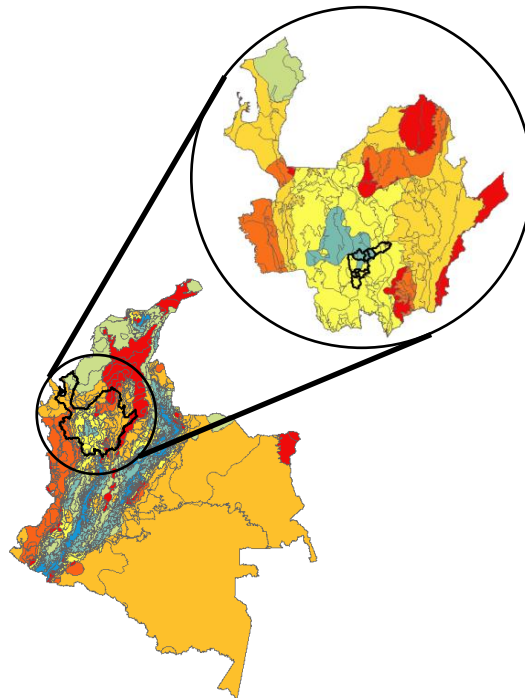


Figura 3-5. Regiones climáticas en Colombia y Antioquia (elaboración propia).

Tabla 3.1. Áreas de las regiones climáticas en Colombia y Antioquia (Ministerio de las TIC, 2018).

REGION	COLOMBIA		ANTIOQUIA	
	ÁREA [Km ²]	ÁREA [%]	ÁREA [Km ²]	ÁREA [%]
R1	32029	2.76	0	0.00
R2	78142	6.73	3306	5.21
R3	109079	9.39	3019	4.75

REGION	COLOMBIA		ANTIOQUIA	
	ÁREA [Km ²]	ÁREA [%]	ÁREA [Km ²]	ÁREA [%]
R4	58853	5.07	19893	31.32
R5	723456	62.27	22233	35.01
R6	71687	6.17	8789	13.84
R7	88620	7.63	6266	9.87
TOTAL	1'161867	100.00	63506	100.00

Partiendo de la *Figura 3-5*, se calculó el mapa de regiones climáticas del Valle de Aburrá (*Figura 3-6*, *Figura 3-7* y *Figura 3-8*). En la *Tabla 3.2* se incorporó el cálculo de las áreas geográficas asociadas.

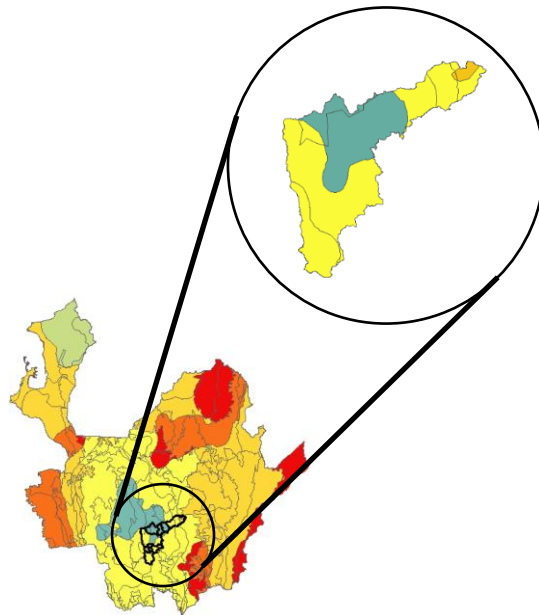


Figura 3-6. Regiones climáticas en Antioquia y el Valle de Aburrá (elaboración propia).

Título: Análisis por confiabilidad del modelo de diseño AASHTO-93 para pavimentos flexibles en el Valle de Aburrá.



Figura 3-7. Regiones climáticas en el Valle de Aburrá (elaboración propia).



Figura 3-8. Regiones climáticas y municipios del Valle de Aburrá (elaboración propia).

Tabla 3.2. Áreas de las regiones climáticas en el Valle de Aburrá.

REGION	ÁREA [Km ²]	ÁREA [%]
R2	391	33.51
R4	755	64.63
R5	22	1.86
TOTAL	1168	100.00

La **Tabla 3.2** indica que el 64.63% del territorio del Valle de Aburrá se encuentra en la región climática R4 y, según la **Figura 3-8**, está conformada por los municipios de Caldas, La Estrella, Itagüí, Sabaneta, Envigado, Barbosa y las zonas Occidental y Oriental de Medellín. El 33.51% del territorio está en la región climática R2, conformada por la zona central de Medellín, Bello, Copacabana y Girardota. El 1.86% restante se enmarca en la región climática R5, ubicada al norte de Barbosa.

En consecuencia, se definió el análisis de las estructuras de pavimento flexible en las regiones climáticas R2 y R4 porque abarcan el 97.83% del área del Valle de Aburrá.

3.3 RESISTENCIA DE LA SUBRASANTE

Las categorías de tipo de subrasante fueron establecidas a partir de los rangos de módulo resiliente, o valores de la capacidad de soporte tipo CBR, presentadas en la **Tabla 2.6**.

La correlación utilizada por la *metodología INVIAS 1998*, entre el CBR y el módulo resiliente del suelo, atiende la ecuación de Heukelom & Foster (1960), que es la expresión sugerida por el *método AASHTO 93* (AASHTO, 1993). La **Figura 3-9** representa un análisis detallado de las ecuaciones presentadas en la **Tabla 2.1**, demostrando que la ecuación de Heukelom & Foster (1960) aumenta considerablemente el módulo resiliente para valores de CBR superiores a 5% respecto otros modelos más conservadores como MOP (2004), Lister & Powell (1987), Powell et al. (1984), Poulsen & Stubstad (1980) y AASHTO (1993) *SGG*. Solamente los modelos de Green & Hall (1975) y Uzan et al. (1977) proponen valores mayores de módulo resiliente respecto los obtenidos con la ecuación de Heukelom & Foster (1960). Además, Montejo Fonseca (2006, p. 344) señala que esta expresión se considera racionalmente aproximada para suelos finos con un CBR sumergido no mayor de 10%, presentándose aplicaciones de mayor restricción, como en el caso de Venezuela, donde sólo es utilizada para valores de CBR inferiores a 7.2%.

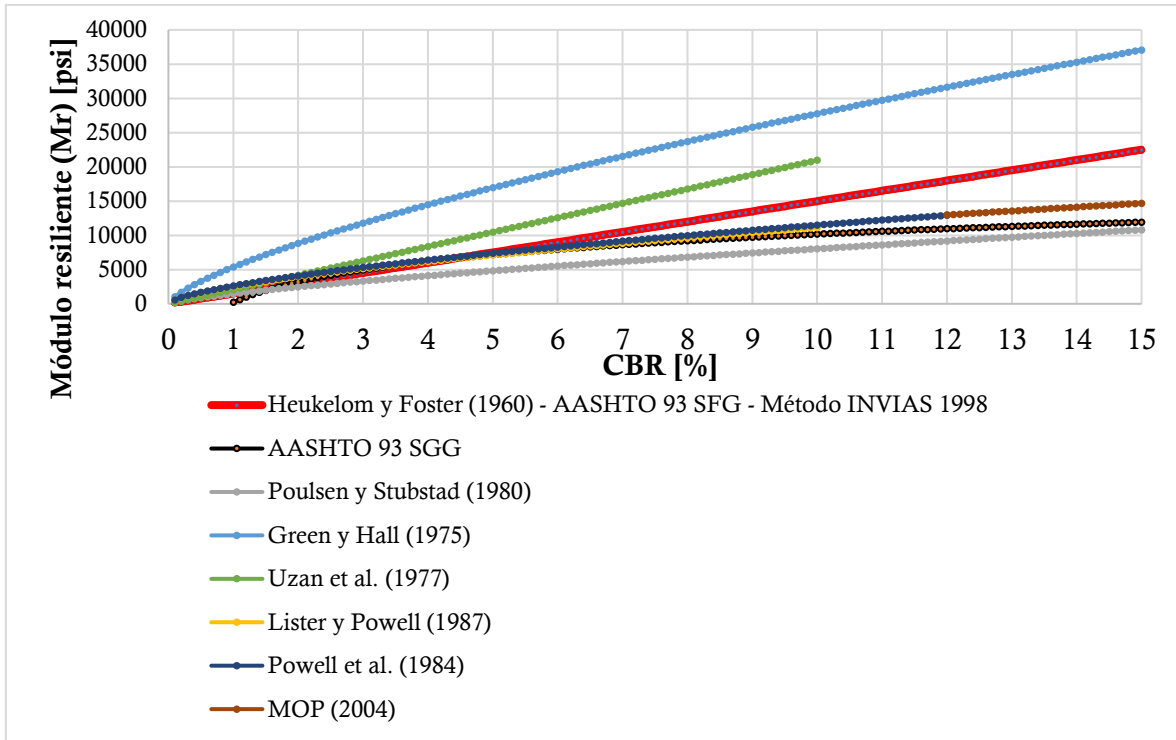


Figura 3-9. Correlaciones del valor del CBR y el módulo resiliente de una subrasante (elaboración propia).

El proyecto consideró el análisis de valores de CBR inferiores a 10% debido a que la correlación empleada para calcular el módulo resiliente de la *metodología INVIAS 1998* aumenta considerablemente la magnitud de esta propiedad geotécnica para CBR mayores a 10%, llegando a duplicar los resultados respecto los otros métodos de cálculo, e induciendo la posibilidad de un sobredimensionamiento de la variable. En consecuencia, se analizaron las categorías S1, S2 y S3.

3.4 RANGO DE TRÁNSITO

La *metodología INVIAS 1998* estableció los rangos de tránsito presentados en la *Tabla 2.7*, considerados entre 500.000 y 40'000.000 de ejes equivalentes de 8.2 t.

Para establecer las categorías de tránsito significativas para el proyecto, se calculó la variación de la carga respecto el número estructural de la subrasante de pavimentos asfálticos, con el *método AASHTO-93*, empleando los parámetros establecidos en la *metodología INVIAS 1998*, para cada una de las categorías de resistencia de subrasante definidas en el subcapítulo 3.3.

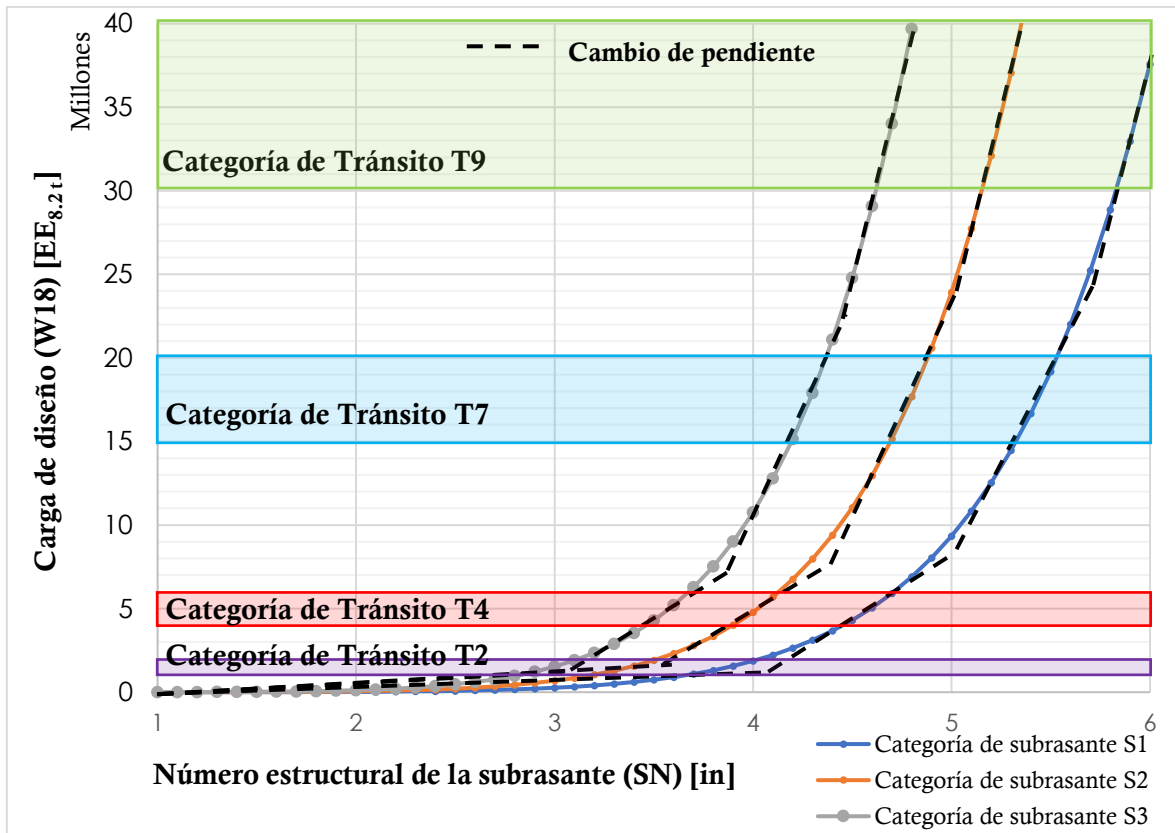


Figura 3-10. Variación del número estructural respecto la carga de diseño de un pavimento flexible diseñado con los parámetros de la metodología INVIAS 1998 (elaboración propia).

La **Figura 3-10** muestra un comportamiento similar en la tendencia de la variación entre el número estructural y la carga de diseño para todas las categorías de la subrasante analizadas. Se identificaron cuatro (4) cambios de pendiente significativos en las curvas obtenidas. El primero se encuentra entre 0 y 2'000.000 de $EE_{8.2t}$ (categorías T1 y T2). El segundo entre 2'000.000 de $EE_{8.2t}$ y 7'500.000 $EE_{8.2t}$ (categorías T3, T4 y T5). El tercer cambio de pendiente se presenta para cargas entre 7'500.000 $EE_{8.2t}$ y 24'000.000 $EE_{8.2t}$ (categorías T5, T6 y T7 y T8). Finalmente, el cuarto cambio se presenta entre 24'000.000 $EE_{8.2t}$ y 40'000.000 $EE_{8.2t}$ (categorías T8 y T9).

Finalmente, se definió el rango medio de cada cambio de pendiente analizado, correspondiente a las categorías T2, T4, T7 y T9 (franjas demarcadas en la **Figura 3-10**).

3.5 COEFICIENTES ESTRUCTURALES Y DE DRENAJE.

La metodología INVIAS 1998 correlaciona las características climatológicas de la vía (TMAP y la PPAM) con los coeficientes estructurales y de drenaje del pavimento (**Tabla 2.2** y **Tabla 2.3**, respectivamente). Las regiones climáticas definidas en el **subcapítulo 3.2** son los grupos R2 y R4. En la **Tabla 3.3** se presentan los coeficientes estructurales y de drenaje utilizados en el dimensionamiento del pavimento, enmarcadas en las regiones de diseño definidas.

Tabla 3.3. Coeficientes estructurales y de drenaje del pavimento correspondientes a las regiones climáticas R2 y R4 (tomado de INVIAS y Ministerio de Transporte (1998)).

PARÁMETRO		RANGO	
REGIÓN		R2	R4
TMAP [°C] (<i>Tabla 2.5</i>)		13 a 20	13 a 20
PMA [mm] (<i>Tabla 2.5</i>)		< 2000	2000 a 4000
COEFICIENTES ESTRUCTURALES (a_i) (<i>Tabla 2.2</i>)	Carpeta Asfáltica (a_1)	0.37	0.37
	Base granular (a_2)	0.14	0.14
	Subbase granular (a_3)	0.12	0.12
COEFICIENTES DE DRENAJE (m_i) (<i>Tabla 2.3</i>)	Base granular (m_1)	1.00	0.90
	Subbase granular (m_2)	1.00	0.90

3.6 ESPEORES DE DISEÑO.

En la *Tabla 2.4*, la metodología INVIAS 1998 presenta estructuras de pavimentos asfálticos que involucran mezclas densas en caliente (MDC), mezclas densas en frío (MDF), bases granulares estabilizadas con cemento (BEC), bases granulares estabilizadas con emulsión asfáltica (BEE), bases granulares (BG) y subbases granulares (SBG).

El proyecto consideró el análisis de la configuración convencional de una estructura de pavimento flexible, en todos los modelos ejecutados: MDC + BG + SBG, y los espesores fueron definidos con base en las regiones climáticas, las categorías de la resistencia de la subrasante y las categorías de tránsito definidas en los capítulos 3.2, 3.3 y 3.4, respectivamente.

Tabla 3.4. Espesores de diseño asociados a las regiones climáticas, la resistencia de la subrasante y la categoría del tránsito (tomado de INVIAS y Ministerio de Transporte (1998)).

CATEGORÍA DE SUBRASANTE	CATEGORÍA DE TRÁNSITO	ESPEORES [cm]					
		REGIÓN R2			REGIÓN R4		
		MDC	BG	SBG	MDC	BG	SBG
S1	T2	10.0	20.0	40.0	10.0	30.0	35.0
S1	T4	10.0	30.0	45.0	15.0	30.0	35.0
S1	T7	15.0	35.0	40.0	20.0	35.0	35.0
S1	T9	17.0	40.0	40.0	22.0	35.0	40.0
S2	T2	7.5	20.0	35.0	10.0	20.0	30.0
S2	T4	10.0	20.0	40.0	15.0	25.0	25.0
S2	T7	15.0	20.0	40.0	20.0	20.0	30.0
S2	T9	15.0	25.0	45.0	20.0	25.0	35.0
S3	T2	7.5	15.0	30.0	10.0	20.0	20.0
S3	T4	10.0	15.0	35.0	10.0	25.0	30.0
S3	T7	12.0	20.0	40.0	15.0	25.0	30.0
S3	T9	15.0	25.0	35.0	15.0	30.0	35.0

3.7 FUNCIONES DE DENSIDAD

En el *método AASHTO-93*, las propiedades estructurales, hidráulicas y geométricas (espesores) de las capas bituminosas y las capas granulares se integran, matemática y físicamente, en el número estructural de cada capa evaluada.

Por otro lado, la única propiedad del suelo que se incorpora en el desarrollo del método es el módulo resiliente, el cual fue explicado en el *subcapítulo 2.1.1*. Como se mencionó anteriormente, Gharaybeh et al, (1998) demostraron que el número estructural y el módulo resiliente son las variables que mayor incidencia tienen en la capacidad de carga de la estructura (carga admisible). Adicionalmente, las capas bituminosas y las capas granulares son de carácter antrópico, es decir, provienen de fuentes externas al sitio de la vía y, desde un enfoque técnico, sus propiedades son identificadas, analizadas, seleccionadas y controladas. En contraposición, los suelos “in situ” son materiales de altas incertidumbres en sus propiedades, debido a su procedencia geológica no controlados antrópicamente, afectados directamente por los distintos procesos de meteorización, erosión y transporte, los cuales alteran directamente las propiedades (Viviescas, 2016, p. 10))

En el caso particular colombiano, las *Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras* (INVIAS y Ministerio de Transporte de Colombia, 2013) estandarizan los materiales asfálticos y granulares para la construcción de pavimentos, como fue mencionado en el subcapítulo 2.2.2. Partiendo de un análisis exclusivo de las características del material, su incertidumbre tiende a ser considerablemente menor que la incertidumbre de las propiedades geotécnicas del suelo. Al respecto, Rendon et al., (2006) indican que el Valle de Aburrá presenta una gran variabilidad en las características geológicas y geomorfológicas. Por ello, adquiere mayor importancia la evaluación de la variabilidad de las características de la subrasante que la de los materiales que componen el cuerpo estructural del pavimento, cuya estandarización enmarcan sus incertidumbres más hacia el proceso constructivo que a la variabilidad de sus propiedades, siendo uno de los problemas potenciales en la geotecnia (Phoon & Kulhawy, 1999).

Kalita & Rajbongshi (2015), Dilip et al. (2013), Dilip & Sivakumar (2013), Luo et al. (2014), entre otros autores señalados en el subcapítulo 2.6, modelaron las variables de diseño de las estructuras de pavimento, incluyendo las propiedades del suelo, por métodos de confiabilidad. Teniendo en cuenta la variabilidad inherente de los suelos, surgen distintos análisis para el diseño geotécnico por medio de los análisis de confiabilidad, empezando por los presentados por Folayan, et al., (1970) y Höeg & Murarka (1974) hasta los más actuales presentados por Phoon & Kulhawy (1999) y Baecher & Christian (2003), los cuales, establecen las ventajas de los análisis por métodos de confiabilidad, al dar herramientas para la toma de decisiones basados en la probabilidad de ocurrencia (Lacasse & Nadim, 1998).

3.7.1 Metodología de diseño

La *metodología INVIAS 1998* es limitada en la información suministrada para sustentar los rangos establecidos en la caracterización de la subrasante de la *Tabla 2.6*. Se establecieron cinco (5) intervalos, los cuales empiezan desde 4267 psi, con pasos variables entre 3000 psi y 7500 psi. Los únicos datos que suministra la metodología son los valores mínimos y máximos de cada rango establecido.

Algunas investigaciones han utilizado las distribuciones normal y log-normal, en los diseños por confiabilidad, para representar la variabilidad del suelo (Viviescas et al., 2017). Según Phoon

(2008), la exactitud con que estas funciones describen las alteraciones continuas que sufren las propiedades del suelo, ha sido ampliamente estudiada comprobándose que es una característica natural e inherente de los suelos. Autores como Dilip et al. (2013) y Rodríguez (2014) obtuvieron funciones de distribución normal y log-normal en la modelación probabilística del módulo resiliente de las subrasantes. Por ello, los modelos establecidos para evaluar la variabilidad del módulo resiliente fueron las funciones de densidad tipo normal y log-normal.

Los parámetros iniciales de ambas funciones son la media y la desviación estándar del módulo resiliente. La media ($\bar{\varphi}'$) fue calculada como el promedio aritmético de los valores extremos de cada rango establecido (rangos S1, S2 y S3 – subcapítulo 3.3). La *Ecuación 2-35* establece el coeficiente de variación (CV) como la relación entre la desviación estándar (s) y la media ($\bar{\varphi}'$). En consecuencia, la incidencia de la función de distribución del módulo resiliente, en la confiabilidad de las estructuras de pavimento, estuvo enmarcada en un análisis paramétrico basado en la evaluación de los modelos de falla, estableciendo distintos coeficientes de variación del módulo resiliente. En consecuencia, la desviación estándar que se utilizó, para el cálculo de cada función, corresponde al producto del valor medio con cada coeficiente de variación establecido, para cada uno de los rangos de subrasante definidos en el proyecto.

En el subcapítulo 2.6 se presentaron coeficientes de variación (CV) para varias propiedades geotécnicas de los suelos. Viviescas (2016) reportó CV entre 1% y 51% para propiedades índices y entre 33% y 52% para valores de N_{60} , Phoon et al. (1995) reportaron CV entre 5% y 80% para valores de resistencia del suelo y entre 2% y 130% para ensayos sobre el suelo y Uzielli et al. (2007) reportó coeficiente entre 6% y 240% para diversas propiedades medidas. Finalmente, Rodríguez (2014) obtuvo CV del módulo resiliente entre 8% y 66% y Dilip et al. (2013) obtuvo CV entre 10% y 20% para la misma propiedad del suelo. En consecuencia, y considerando los valores presentados anteriormente, los coeficientes de variación establecidos para efectuar el análisis de la sensibilidad de las funciones del módulo resiliente fueron 10%, 30%, 50% y 70% para el presente proyecto.

Los valores de la media ($\bar{\varphi}'$) y la desviación estándar (s), definidos para calcular las funciones de densidad normal y log-normal del módulo resiliente, se presentan en la *Tabla 3.5*.

Tabla 3.5. Valores medios ($\bar{\varphi}'$) desviaciones estándar (s) del módulo resiliente para diferentes coeficientes de variación (CV), en cada categoría de subrasante establecida.

RESISTENCIA DE LA SUBRASANTE	MÓDULO RESILIENTE [psi]						
	VALORES		$\bar{\varphi}'$	s			
	Mínimo	Máximo		CV=10%	CV=30%	CV=50%	CV=70%
S1	4267.00	7111.67	5689.34	568.93	1706.80	2844.67	3982.53
S2	7111.67	9956.34	8534.01	853.40	2560.20	4267.00	5973.80
S3	9956.34	14223.30	12089.82	1208.98	3626.95	6044.91	8462.87

3.7.2 Cálculo de funciones

La tendencia estadística de las funciones de densidad normal y log-normal del módulo resiliente fue similar, para cada entorno de suelo analizado, considerando el mismo tipo de función, ya que se obtuvieron los mismos valores de coeficientes de asimetría y curtosis para coeficientes de variación iguales, según se muestra en la *Figura 3-11*.

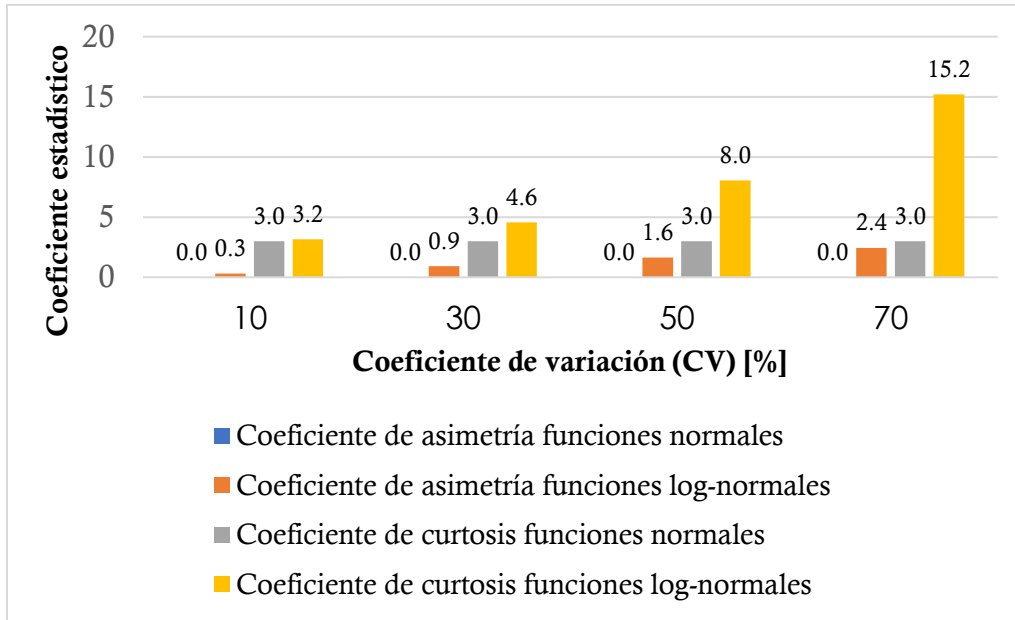


Figura 3-11. Relación del coeficiente de variación (CV) con los coeficientes de asimetría y curtosis de las funciones de densidad del módulo resiliente (M_r), para todos los entornos de subrasante del proyecto.

A manera de ejemplo, la **Figura 3-12** presenta las funciones de densidad normal y log-normal, para el suelo con menor resistencia (S1) y su análisis es replicable en los entornos superiores (S2 y S3). La totalidad de las funciones de densidad del módulo resiliente calculadas se presentan en el ANEXO 1: FUNCIONES DE DENSIDAD DEL MÓDULO RESILIENTE.

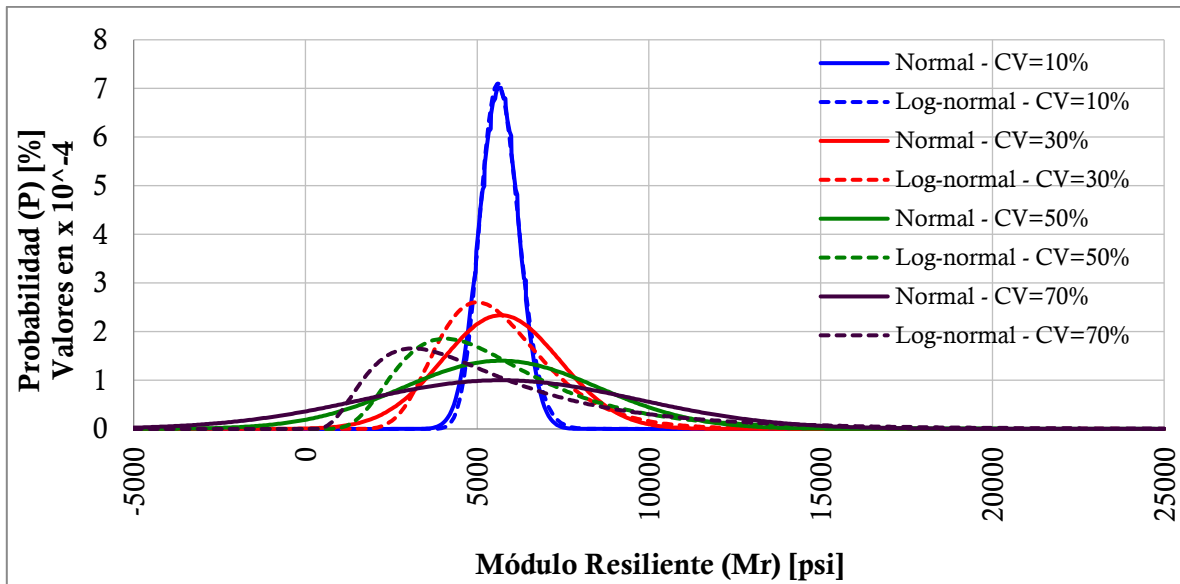


Figura 3-12. Funciones de densidad del módulo resiliente para el suelo tipo S1. (Convenciones de funciones: CV=10% - línea roja, CV=30% - línea azul, CV=50% - línea morada, CV=70% - línea negra).

En la **Figura 3-12**, se obtuvo que las medianas de las funciones (picos) disminuyen, y las colas se vuelven más pesadas, con el aumento de la desviación estándar (s) y, en consecuencia, con el aumento del coeficiente de variación (CV) del módulo resiliente, en ambos tipos de función. Esto genera una concentración de datos en los extremos, lo que se traduce en que el aumento del CV incrementa la probabilidad que el módulo resiliente sea menor al rango mínimo establecido en la metodología INVIAS 1998 establecidas en la **Tabla 2.6**, como se muestra en la **Figura 3-13**.

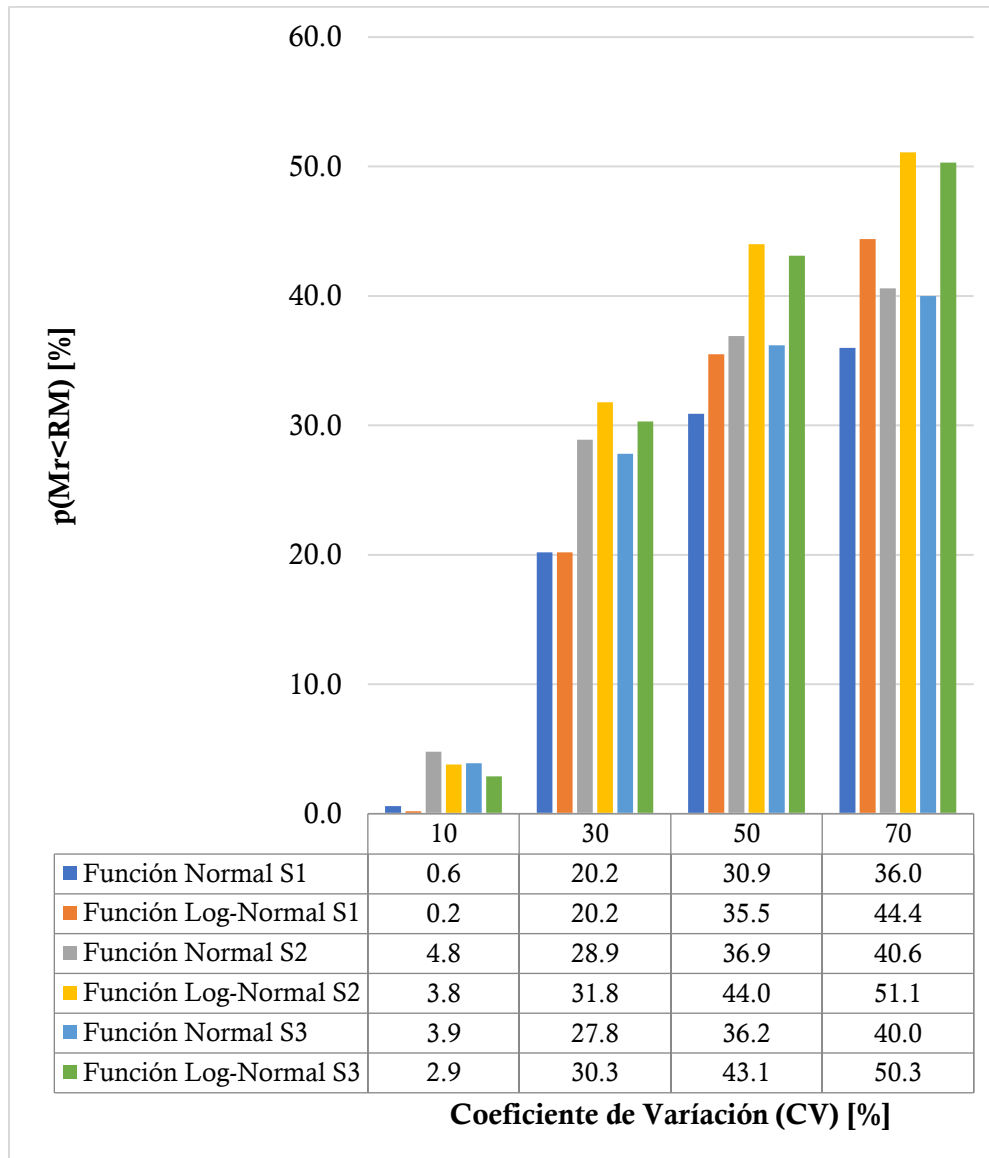


Figura 3-13. Comparación de la relación entre el coeficiente de variación (CV) con la probabilidad que el módulo resiliente (M_r) sea menor al rango mínimo (RM), establecido en la metodología INVIAS 1998, para las funciones de densidad normal y log-normal de todos los entornos de suelos definidos en el proyecto.

Todas las funciones de densidad normal del módulo resiliente son mesocúrticas y las funciones de densidad log-normal son leptocúrticas y presentan asimetría positiva (ver *Figura 3-12*). Por ello, se presentó una concentración de valores menores del módulo resiliente en las funciones log-normales respecto las normales. En consecuencia, las funciones de densidad log-normal del módulo resiliente presentaron mayor probabilidad de tener valores menores, al rango mínimo establecido en la metodología INVIAS 1998, considerando valores de coeficiente de variación de la propiedad superiores al 10%, bajo el mismo entorno de suelo, según se reporta en la *Figura 3-13*.

Específicamente, la **Figura 3-13** indica que la probabilidad que el módulo resiliente (M_r) sea menor al valor mínimo del rango establecido por la *metodología INVIAS 1998*, considerando todos los entornos de suelo y coeficientes de variación (CV) del M_r , varía entre 0.6% y 40.0% para la función normal y entre 0.2 y 51.1% para la función log-normal.

Los resultados presentados comprueban, efectivamente, que el aumento del coeficiente de variación (CV) del módulo resiliente (M_r) incrementa la probabilidad de obtener valores de M_r inferiores al valor del rango mínimo establecido por la *metodología INVIAS 1998*, con una razón de cambio alta en los CV menores y más baja en los CV mayores.

3.8 DISCUSIONES Y CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

- La región del Valle de Aburra se caracteriza por una disminución progresiva en las alturas de los municipios que lo conforman, en dirección sur – norte (**Figura 3-3** y **Figura 3-4**).
- El Valle de Aburrá está caracterizado por tres (3) regiones climáticas. Al sur la temperatura es baja y la precipitación alta, en el centro la precipitación y la temperatura son medias y al norte la temperatura y la precipitación son altas. Según la clasificación establecida por la *metodología INVIAS 1998* (**Tabla 2.5**) y el análisis SIG de la **Tabla 3.2**, el 64.63% del territorio se encuentra en la región R4, el 33.51% se encuentra en la región R2 y el 1.86% se encuentra en la región R5.
- Para el cálculo del módulo resiliente, la *metodología INVIAS 1998* empleó la ecuación de Heukelom & Foster (1960), siendo un modelo que sobredimensiona el módulo para valores de CBR superiores al 5%, llegando a duplicar los resultados obtenidos, respecto otros métodos, para valores superiores al 15%. En consecuencia, se evaluaron los rangos de valores de módulo resilientes asociados hasta un CBR de 10%, específicamente los entornos de resistencia de S1, S2 y S3 reportados en la **Tabla 2.6**, demostrando que la ecuación de la *metodología INVIAS 1998* sobredimensiona los módulo resiliente calculados con valores de CBR superiores al 10%.
- Se identificaron cuatro (4) tendencias en la pendiente de cambio entre el número estructural (SN) del pavimento (espesores de diseño) y el tránsito de diseño (W_{18}), en la **Figura 3-10**. Al inicio, la variación de la carga de diseño tiene poca sensibilidad con el aumento del espesor. Al final ocurre lo contrario, la variación de la carga de diseño es altamente sensible con el aumento del espesor de la estructura. Los rangos de tránsito fueron obtenidos como los límites medios aproximados de cada cambio de pendiente de la **Figura 3-10**, obteniéndose los rangos de tránsito T2, T4, T7 y T9 que fueron descritos en la **Tabla 2.7**.
- Los pavimentos, como cualquier otra solución geotécnica, están expuestos a condiciones de incertidumbre en todas sus fases, desde el diseño y la construcción, hasta la operación y mantenimiento de la vía. En particular, la incertidumbre asociada a las características de los materiales de la estructura, específicamente el módulo resiliente, es menor para los asfaltos y las capas granulares del pavimento, ya que en Colombia estos materiales están sometidos a procesos de producción y construcción estandarizados. En

consecuencia, el proyecto se enfocó en la evaluación y modelación de la incertidumbre del módulo en el suelo de subrasante

- Varios autores indican que las funciones de densidad normal y log-normal modelan adecuadamente varias propiedades geotécnicas, entre las que se encuentran el ángulo de fricción, la cohesión y el peso unitario. La mayor parte de las funciones de módulo resiliente, a nivel de subrasante, obtenidas por autores como (Dilip et al., 2013) y Rodríguez (2014) están entre los modelos normal y log-normal. Adicionalmente, la forma como la *metodología INVIAS 1998* clasifica y presenta la información, del módulo resiliente de la subrasante, se acopla adecuadamente a los estadísticos de la media y la desviación estándar, por lo cual estos dos (2) tipos de funciones fueron definidas para modelar la variabilidad del módulo resiliente de la subrasante.
- Para evaluar la sensibilidad de las funciones de densidad del módulo resiliente, en la función de confiabilidad de las estructuras de pavimento, se establecieron (4) cuatro condiciones de variación de la desviación estándar, considerando distintos coeficientes de variación, en cada entorno de suelo analizado: 10%, 30%, 50% y 70%; considerando la revisión bibliográfica realizada.
- En ambos tipos de función de densidad (normal y log-normal) y en todos los entornos de subrasante analizados (S1, S2 Y S3), la probabilidad de obtener valores del módulo resiliente inferiores, al valor del rango mínimo establecido por la *metodología INVIAS 1998*, es mayor al aumentar el coeficiente de variación (CV) del módulo. Asimismo, dicha probabilidad es menor para las funciones de densidad normal del módulo resiliente, respecto las funciones log-normales, para valores de CV superiores al 10%, considerando el mismo entorno de subrasante, con una diferencia máxima de 10 puntos porcentuales.

4 MODELACIÓN Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO.

La definición de las variables de diseño delimita los modelos de falla, de las estructuras de pavimento, que son objeto de análisis del proyecto. En la **Tabla 4.1** se agrupan las categorías de diseño definidas, en la zona de estudio, con base en la *metodología INVIAS 1998*.

Tabla 4.1. Categorías de diseño definidas para el Valle de Aburrá

CONDICIÓN	CATEGORÍA	RANGO
Región climática (R) (Tabla 2.5)	R2	$13^{\circ} \leq \text{TMAP} < 20^{\circ}$ $2000 \text{ mm} < \text{PMA}$
	R4	$13^{\circ} \leq \text{TMAP} < 20^{\circ}$ $2000 \text{ mm} \leq \text{PMA} < 4000 \text{ mm}$
Resistencia de subrasante (S) (Tabla 2.6)	S1	$4267 \text{ psi} \leq \text{Mr} < 7112 \text{ psi}$
	S2	$7112 \text{ psi} \leq \text{Mr} < 9956 \text{ psi}$
	S3	$9956 \text{ psi} \leq \text{Mr} < 14223 \text{ psi}$
Rango de tránsito (T) (Tabla 2.7)	T2	$1 \times 10^6 \text{ EE}_{8.2t} \leq \text{T} < 2 \times 10^6 \text{ EE}_{8.2t}$
	T4	$4 \times 10^6 \text{ EE}_{8.2t} \leq \text{T} < 6 \times 10^6 \text{ EE}_{8.2t}$
	T7	$15 \times 10^6 \text{ EE}_{8.2t} \leq \text{T} < 20 \times 10^6 \text{ EE}_{8.2t}$
	T9	$30 \times 10^6 \text{ EE}_{8.2t} \leq \text{T} < 40 \times 10^6 \text{ EE}_{8.2t}$

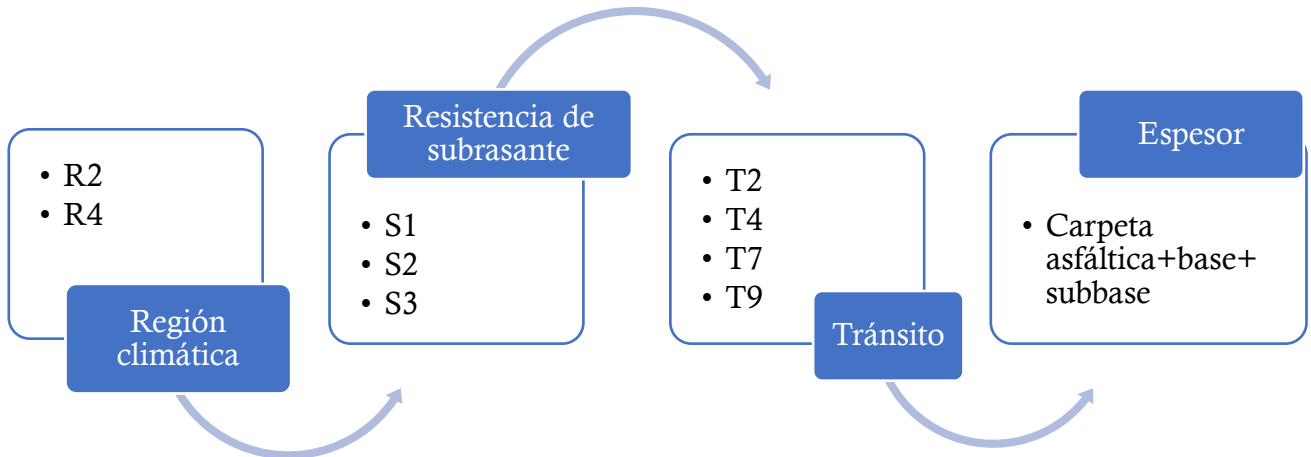


Figura 4-1. Diagrama de flujo con la secuencia de las variables para la selección de la estructura de pavimento.

Para calcular los espesores de diseño, las variables enmarcadas en el capítulo anterior se ajustan a la secuencia presentada en la **Figura 4-1**. La integración del componente probabilístico, a la *metodología INVIAS 1998*, se genera incorporando la función de densidad del módulo resiliente

analizada en el *capítulo 3.7*. Finalmente, la modelación estadística de la *Ecuación 2-17* (*método AASHTO-93*), mediante el *Método Montecarlo*, permitió obtener la función de densidad de falla de cada estructura analizada.

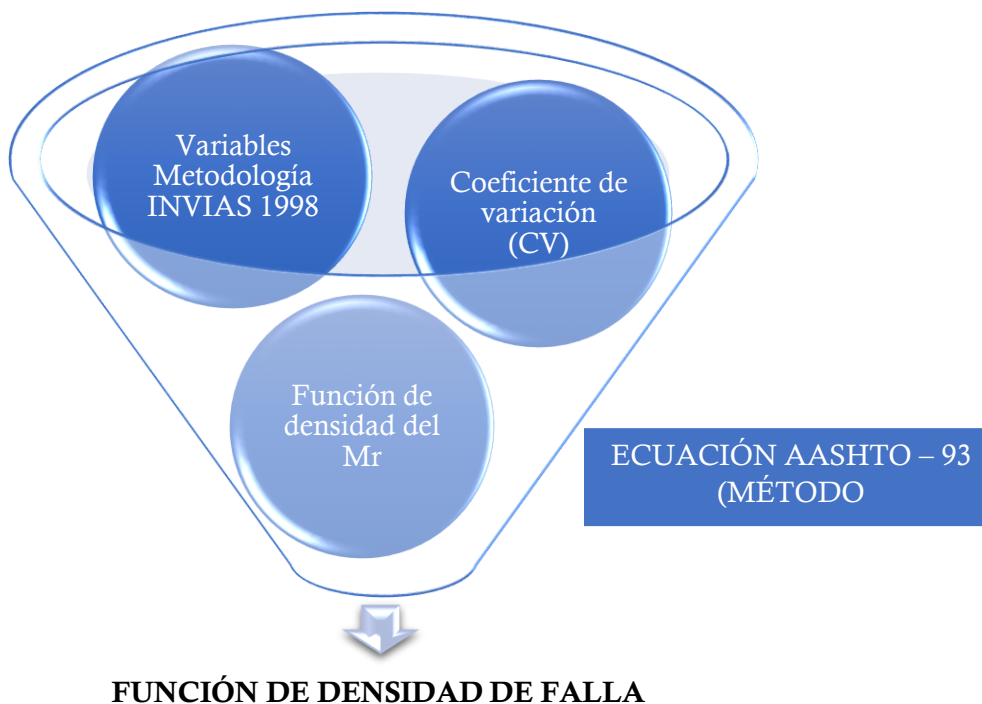


Figura 4-2. Proceso de cálculo de la función de densidad de falla de la estructura de pavimento.

La metodología de cálculo de la función de densidad de falla de una estructura de pavimento, obtenida por la *metodología INVIAS 1998*, se presenta a continuación.

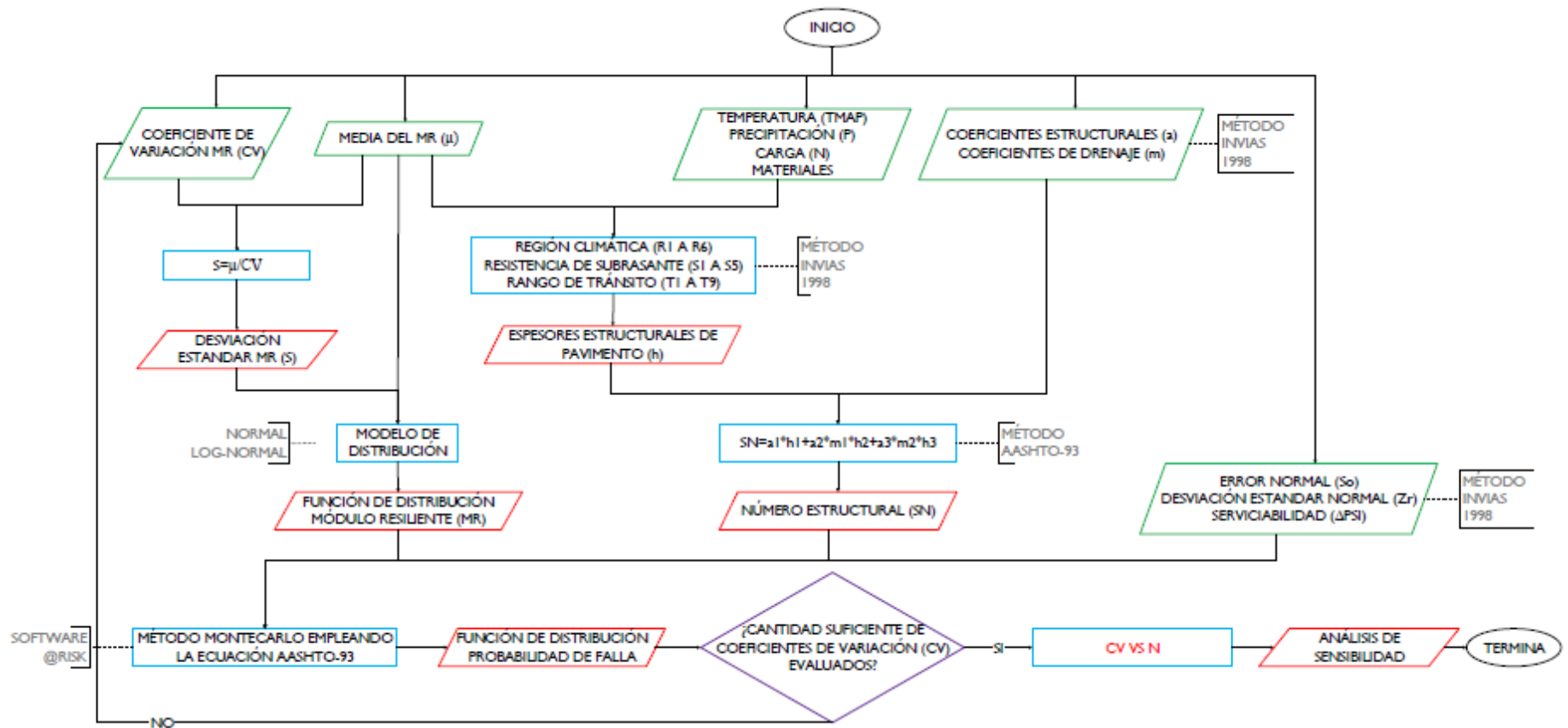


Figura 4-3. Metodología de cálculo de la función de densidad de falla de un pavimento obtenido por la metodología INVIAS 1998.

En definitiva, se modelaron 192 funciones de densidad de falla, correspondientes a 91 funciones por cada región climática del Valle de Aburrá enmarcada en el proyecto (R2 y R4), efectuando todas las combinaciones posibles de las variables determinísticas, estadísticas y probabilísticas presentadas en la Figura 4-1, Figura 4-2 y Figura 4-3.

4.1 FACTOR DE SEGURIDAD DETERMINISTICO

En la Figura 4-4 y Figura 4-5 se validaron las estructuras definidas en el subcapítulo 3.6 con la *ecuación AASHTO-93 (Ecuación 2-17)* para cada región analizada (R2 y R4), considerando las condiciones más desfavorables de diseño establecidas en la *metodología INVIAS 1998*. Para ello, se calculó la carga asociada al límite inferior del rango del entorno de subrasante de cada estructura, empleando los espesores recomendados, y se comparó con el límite superior de carga, de cada categoría de tránsito, que cada estructura puede soportar, según lo establecido por la *Metodología*.

$$FS = \frac{N_{DISEÑO}}{N_{ADMISIBLE}}$$

Donde,

- FS** Es el factor de seguridad de la estructura.
- $N_{DISEÑO}$** Es la carga máxima solicitada posible, establecida por cada categoría de tránsito de la *metodología INVIAS 1998 (Tabla 2.7)*, denominada carga de diseño.
- $N_{ADMISIBLE}$** Es la carga admisible de la estructura de pavimento considerando el módulo resiliente menor posible, evaluada con la *ecuación AASHTO-93*

En consecuencia, la estructura garantizará su vida útil si **FS < 100%**.

Título: Análisis por confiabilidad del modelo de diseño AASHTO-93 para pavimentos flexibles en el Valle de Aburra.

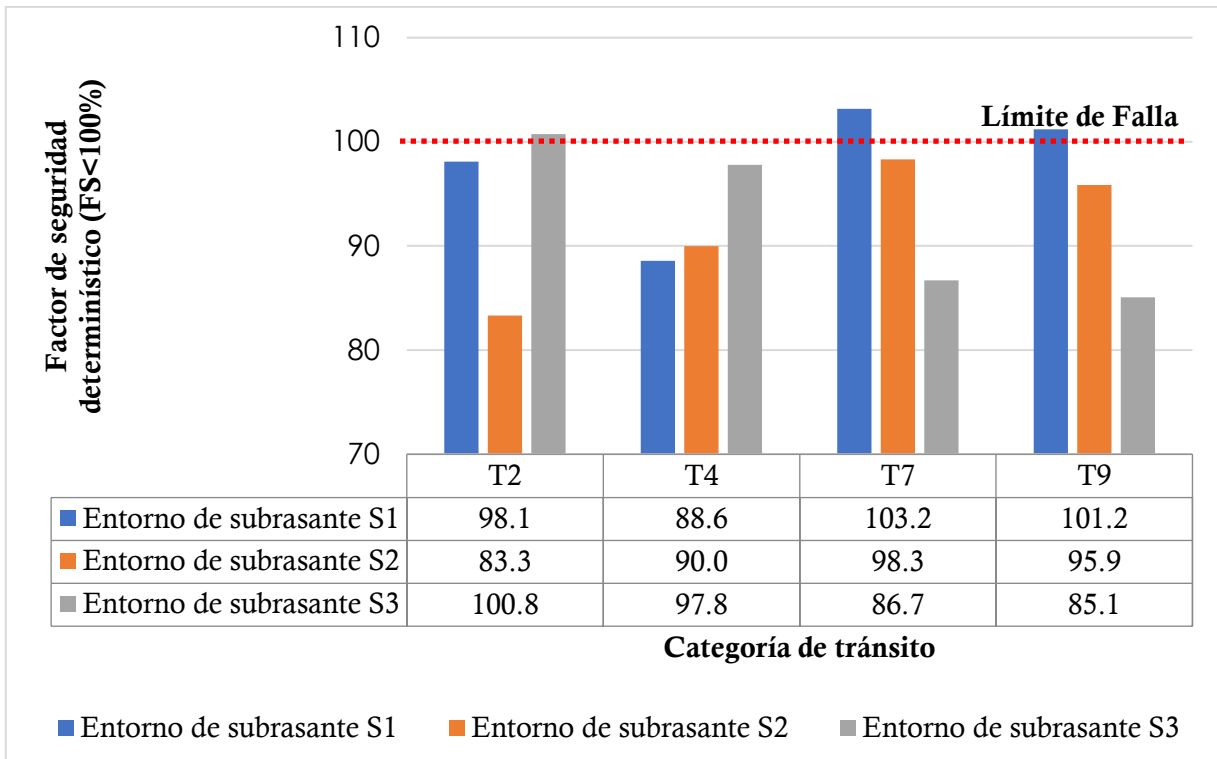


Figura 4-4. Factor de seguridad determinístico de las estructuras de pavimento de la región R2.

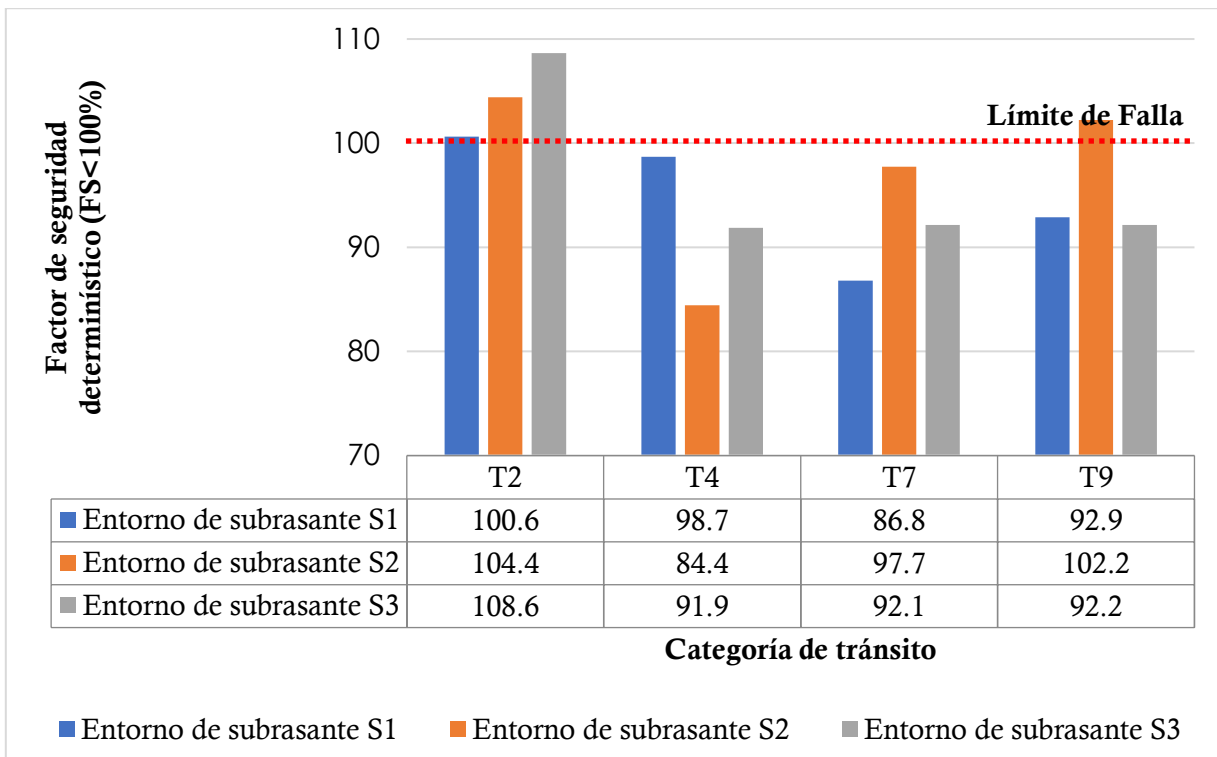


Figura 4-5. Factor de seguridad determinístico de las estructuras de pavimento de la región R4.

En ambas regiones analizadas se obtuvo que el 25% de las estructuras estudiadas en este proyecto no cumple con el factor de seguridad (FS) determinístico, considerando las condiciones más desfavorables de diseño. El 75% de las estructuras restantes presentan factores muy cercanos al 100%, lo que implicaría un margen reducido en la incertidumbre asociada a las variables de cálculo, lo cual podría traducirse en un aumento en la probabilidad de falla del pavimento. En consecuencia, el análisis probabilístico sobre las estructuras adquiere mayor importancia ante los resultados presentados.

4.2 CALIBRACIÓN DEL MÉTODO MONTE CARLO

Para calibrar el método, se calculó la media de las funciones de falla de la categoría de tránsito más baja (T2), para cada tipo de función de densidad del módulo resiliente, en cada entorno de subrasante definido y considerando un coeficiente de variación (CV) del 10%. Se definió un rango de iteraciones a evaluar entre 500 y 1500 ciclos, con un paso de 100 ciclos.

4.2.1 Región 2

En la *Figura 4-6*, *Figura 4-7* y *Figura 4-8* se presenta la calibración del Método Montecarlo para la región R2, considerando cada entorno de subrasante y la categoría de menor carga de tránsito (T2).

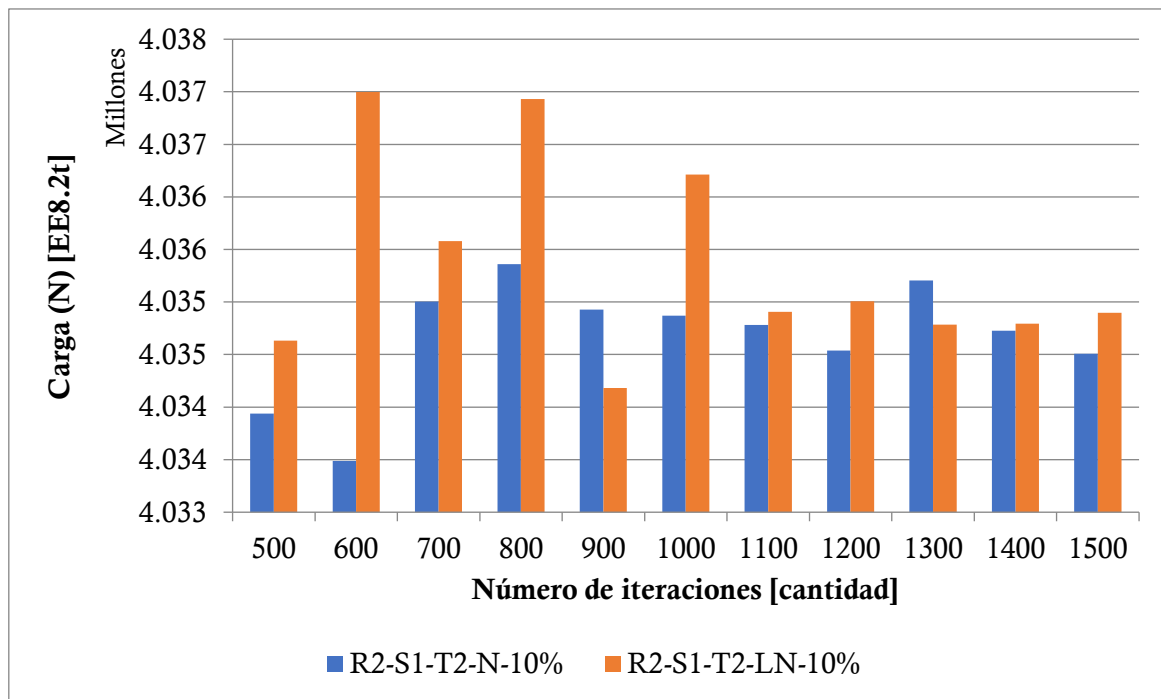


Figura 4-6. Calibración entorno de subrasante S1, región R2.

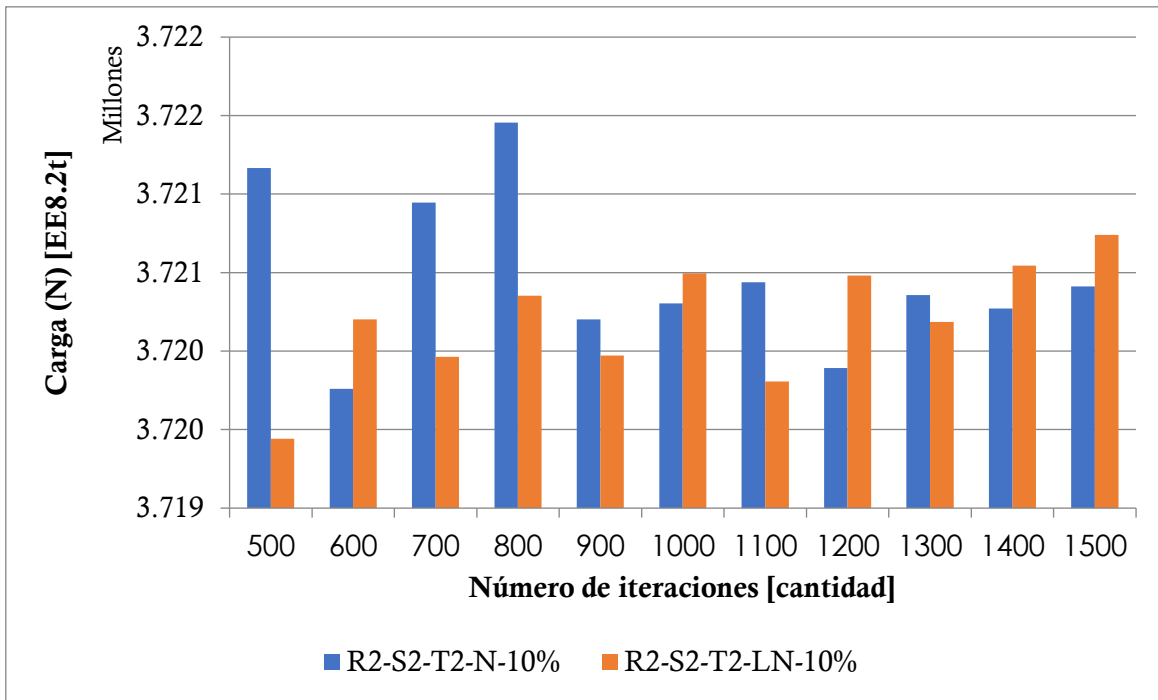


Figura 4-7. Calibración entorno de subrasante S2, región R2.

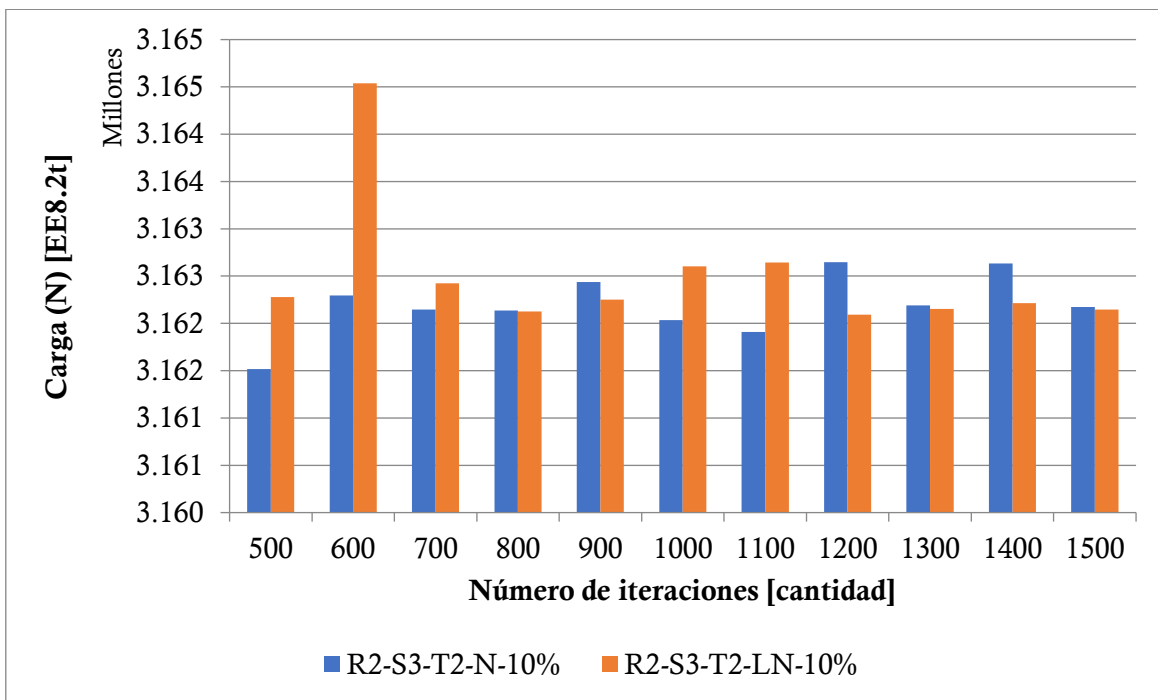


Figura 4-8. Calibración entorno de subrasante S3, región R2.

Las tendencias obtenidas en la *Figura 4-6*, *Figura 4-7* y *Figura 4-8* indican que los resultados de la media de las funciones, asociadas al entorno de subrasante S1, convergen a partir de 1100 iteraciones, del S2 a partir de 900 iteraciones y del S3 a partir de 700 iteraciones,

respectivamente. En consecuencia, los modelos desarrollados para la Región R2 fueron efectuados con 1100 ciclos de iteración.

4.2.2 Región 4

En la *Figura 4-9*, *Figura 4-10* y *Figura 4-11* se presenta la calibración del *Método Montecarlo* para la región R4, asociada a cada entorno de subrasante y a la categoría de menor carga de tránsito (T2).

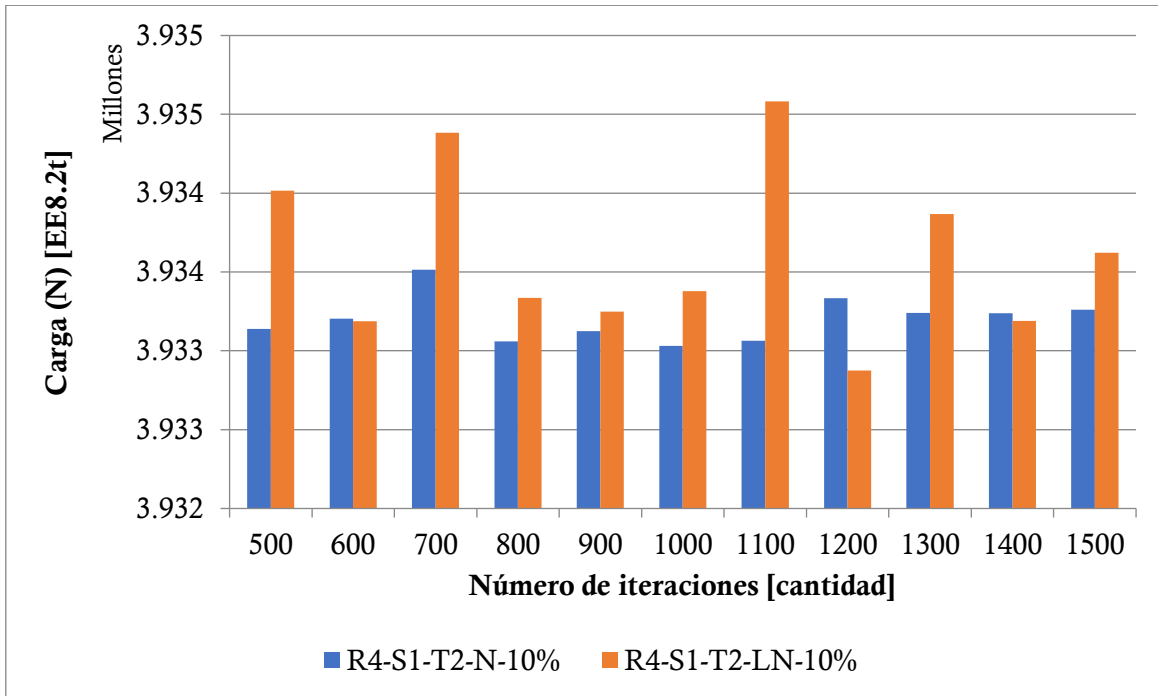


Figura 4-9. Calibración entorno de subrasante S1, región R4.

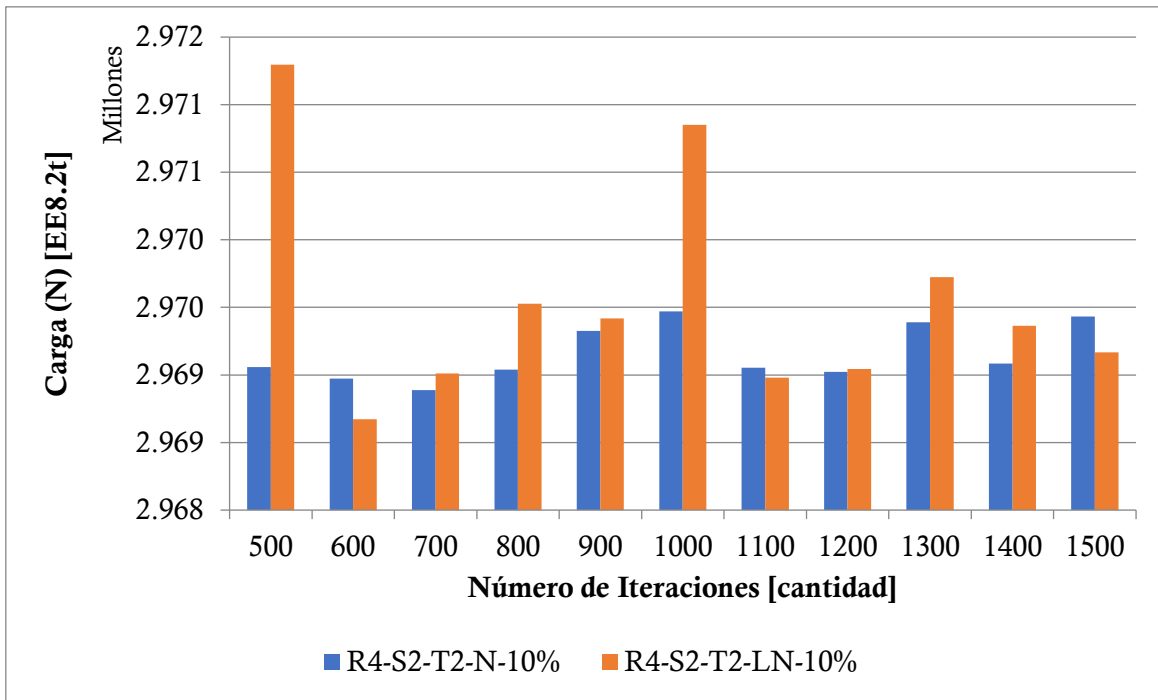


Figura 4-10. Calibración entorno de subrasante S2, región R4.

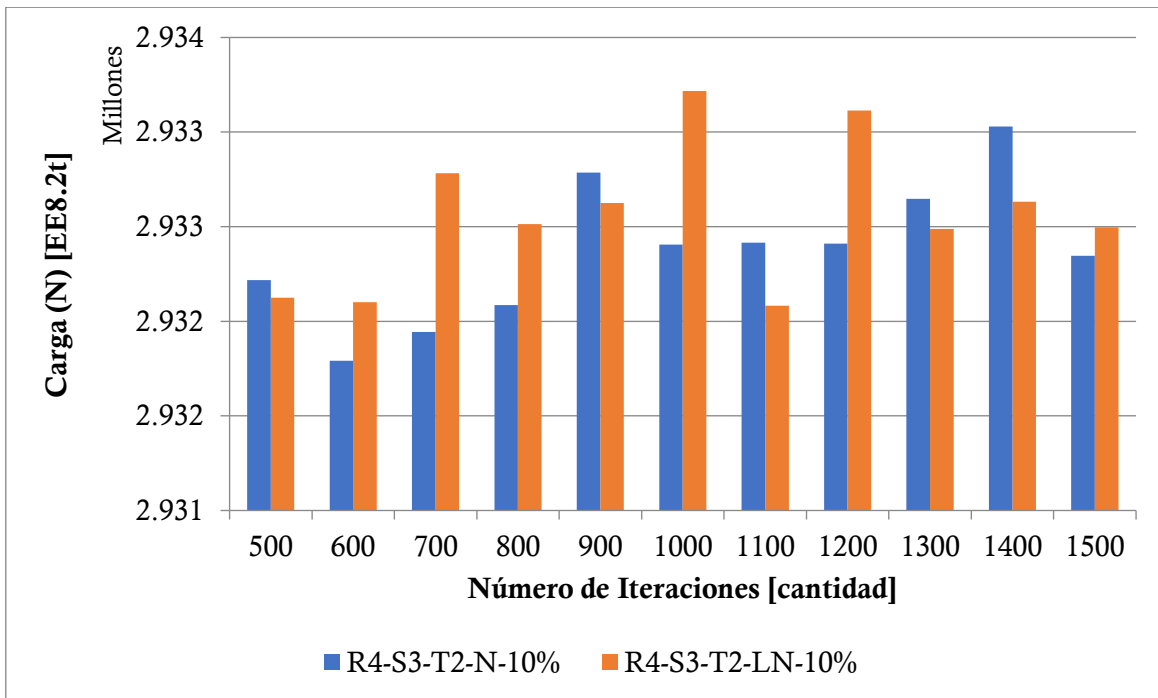


Figura 4-11. Calibración entorno de subrasante S3, región R4.

Las tendencias obtenidas en la *Figura 4-9*, *Figura 4-10* y *Figura 4-11* indican que los resultados de la media de las funciones, asociadas al entorno de subrasante S1, convergen a partir de 1200 iteraciones, del S2 a partir de 1000 iteraciones y del S3 a partir de 1300 iteraciones,

respectivamente. En consecuencia, los modelos desarrollados para la Región R4 fueron efectuados con 1300 ciclos de iteración.

4.3 FUNCIÓN DE DENSIDAD DE FALLA

La función de densidad de falla de una estructura de pavimento permite evaluar la probabilidad de ocurrencia de un determinado valor de carga admisible, de tal forma que la ocurrencia de cargas inferiores al límite establecido implican condiciones de falla de la estructura (pf) y la ocurrencia de carga superiores implican condiciones de confiabilidad ($1 - pf$), según fue descrito en la *Figura 2-3*.

El análisis estadístico de las funciones de densidad de falla de las regiones analizadas (R2 y R4) presentó resultados similares, conforme se presenta en el Anexo FUNCIÓN DE AJUSTE, considerando entornos de subrasante, categorías de tránsito y coeficientes de variación iguales. Esto ocurre porque las variables determinísticas y probabilísticas empleadas en la ecuación de cálculo base del *método AASHTO-93 (Ecuación 2-17)* son iguales, o muy similares, para ambas regiones, considerando la *metodología INVIAS 1998*, conforme se presentó en el subcapítulo 2.2.2.

En consecuencia, las únicas variables que presentaron valores distintos entre las regiones fueron los coeficientes de drenaje (m_i) de los materiales granulares (1.0 para la región R2 y 0.9 para la región R4) y los espesores de las estructuras de pavimento propuestos por la *metodología INVIAS 1998* que, según la *Tabla 3.4*, tienen variaciones entre 0 cm y 10.0 cm por capa.

A manera de ejemplo, se presenta el análisis probabilístico de la región R4, que es replicable a la región R2.

Las funciones de densidad de falla, modelada con funciones normales del módulo resiliente, se ajustaron a una función tipo Gamma (coeficiente de variación (CV) del módulo resiliente de 10% y 70%), tipo Weibull (CV=30%) y tipo BetaGeneral (CV=50%). Respecto las funciones de densidad de falla asociadas a funciones log-normales del módulo resiliente, se ajustaron a una tipo Log-Normal en todos los coeficientes de variación evaluados. Todas las funciones de falla obtenidas son leptocúrticas y asimétricas positivas

La totalidad de los tipos de funciones que describen el comportamiento de las funciones de densidad de falla obtenidas (Gamma, Weibull, BetaGeneral y Log-Normal) tienen como base estadística el *Modelo Exponencial*, que matemáticamente es concordante con la función de transformación básica de la *ecuación AASHTO-93* (función logarítmica) (*Ecuación 2-17*). En general, las (4) cuatro tipologías de funciones obtenidas presentan colas pesadas al inicio y suaves y alargadas al final, lo que origina una concentración de datos en el tramo inicial de las funciones. Con ello, se genera una tendencia de tener probabilidades de falla altas para valores de carga bajos.

4.4 CONFIABILIDAD ESTABLECIDA POR LA METODOLOGÍA INVIAS 1998

Como fue descrito en el *subcapítulo 2.2.2*, la *metodología INVIAS 1998* estableció un nivel de confiabilidad del 90% en sus estructuras diseñadas.

Para evaluar la confiabilidad establecida por la metodología, en las funciones de densidad de falla calculadas, se definió la relación estadística entre las cargas correspondientes a las probabilidades de falla inferiores al 10% ($p_f \leq 10\%$), de cada estructura, con el respectivo coeficiente de variación del módulo resiliente. Así, se obtuvo el coeficiente de variación asociado al valor mínimo de carga, establecida en cada rango de tránsito, que garantizara la confiabilidad de la *metodología INVIAS 1998*.

La *Figura 4-12* ilustra el procedimiento efectuado para obtener la carga de diseño asociada a una confiabilidad del 90%, en una función de densidad de falla específica.

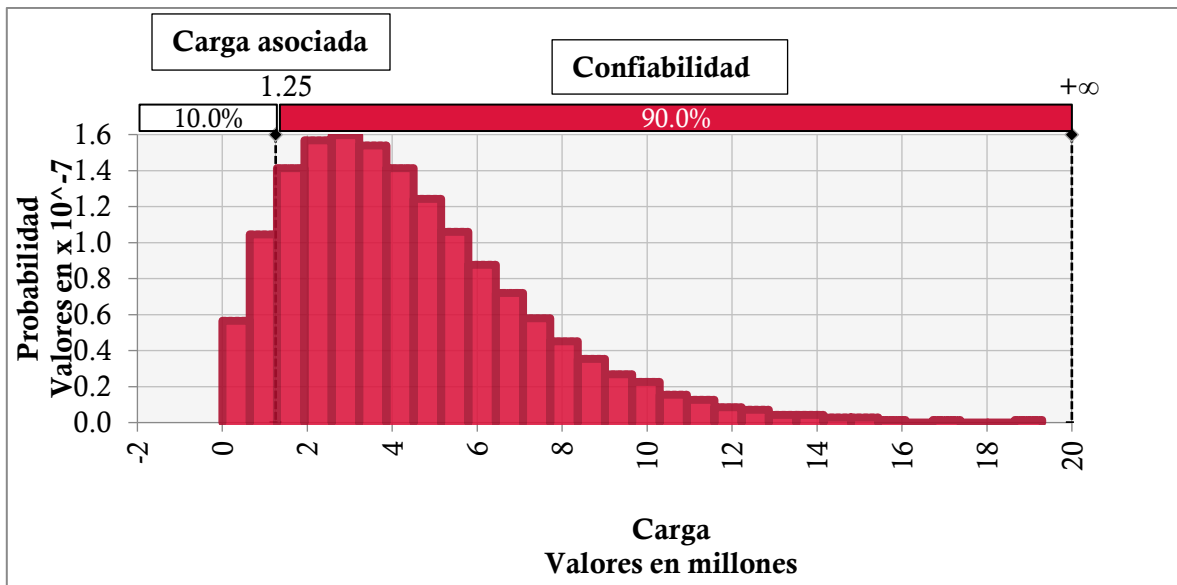


Figura 4-12. Función de densidad de falla R4-S1-T2-N-30%. Cálculo de la carga de diseño asociada a una confiabilidad del 90% (*metodología INVIAS 1998*) para una estructura de pavimento con el suelo más desfavorable (S1), el rango de tránsito menor (T2) y una función de densidad del módulo resiliente normal con un coeficiente de variación del módulo del 30%, en la región R4.

Según lo demostrado en el subcapítulo 4.3 respecto la similitud de las funciones de densidad de falla de las estructuras entre regiones, el análisis de la confiabilidad de la región R2 es similar al de la región R4. A manera de ejemplo, se efectúa el estudio de la región R4, el cual es replicable en la región R2. En la *Figura 4-13* y *Figura 4-14* se relaciona la carga de diseño asociada a una confiabilidad del 90%, en las estructuras de pavimento de la *metodología INVIAS 1998*, considerando las funciones de densidad del módulo resiliente normal y log-normal, respectivamente. En el ANEXO 2: FUNCIONES DE DENSIDAD DE FALLA se presentan las gráficas y modelos obtenidos para la región R2.

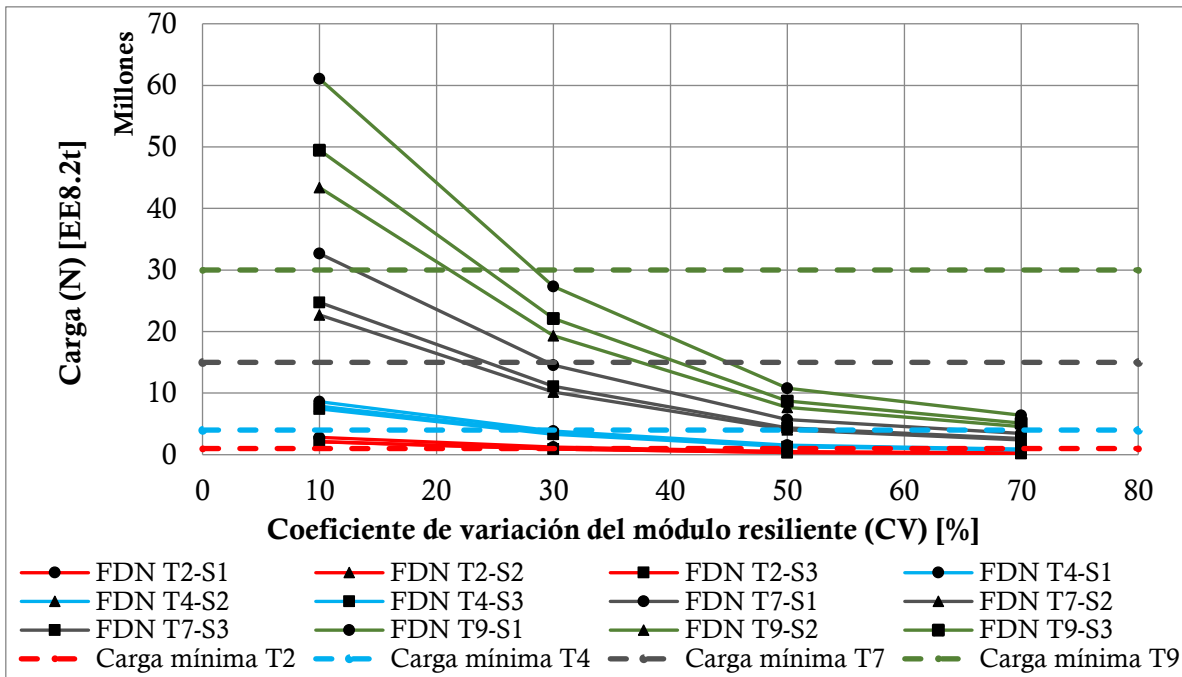


Figura 4-13. Carga de diseño asociada a una confiabilidad del 90%, en las estructuras de pavimento de la metodología INVIAS 1998, considerando las funciones de densidad del módulo resiliente normal, para la región R4.

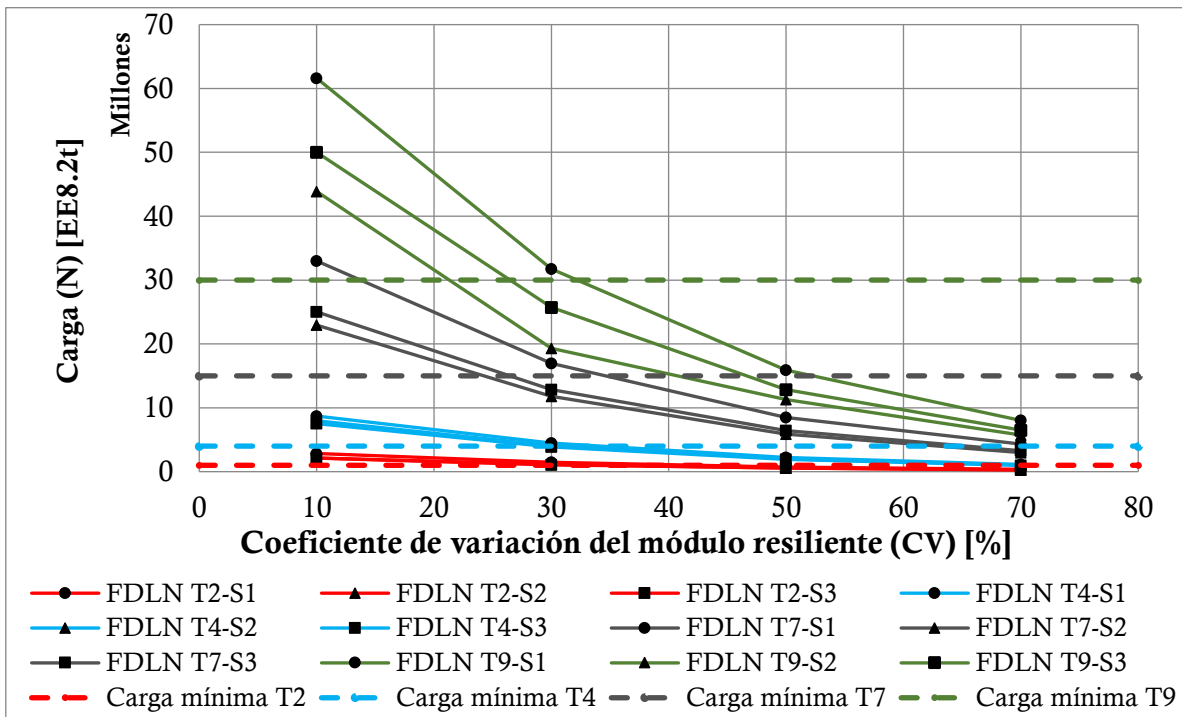


Figura 4-14. Carga de diseño asociada a una confiabilidad del 90%, en las estructuras de pavimento de la metodología INVIAS 1998, considerando las funciones de densidad del módulo resiliente log-normal, para la región R4.

La evaluación de la confiabilidad establecida por la *metodología INVIAS 1998* en la **Figura 4-13** y **Figura 4-14** se resume en la **Figura 4-15** para la región R4, considerando las funciones de densidad normal y log-normal del módulo resiliente.

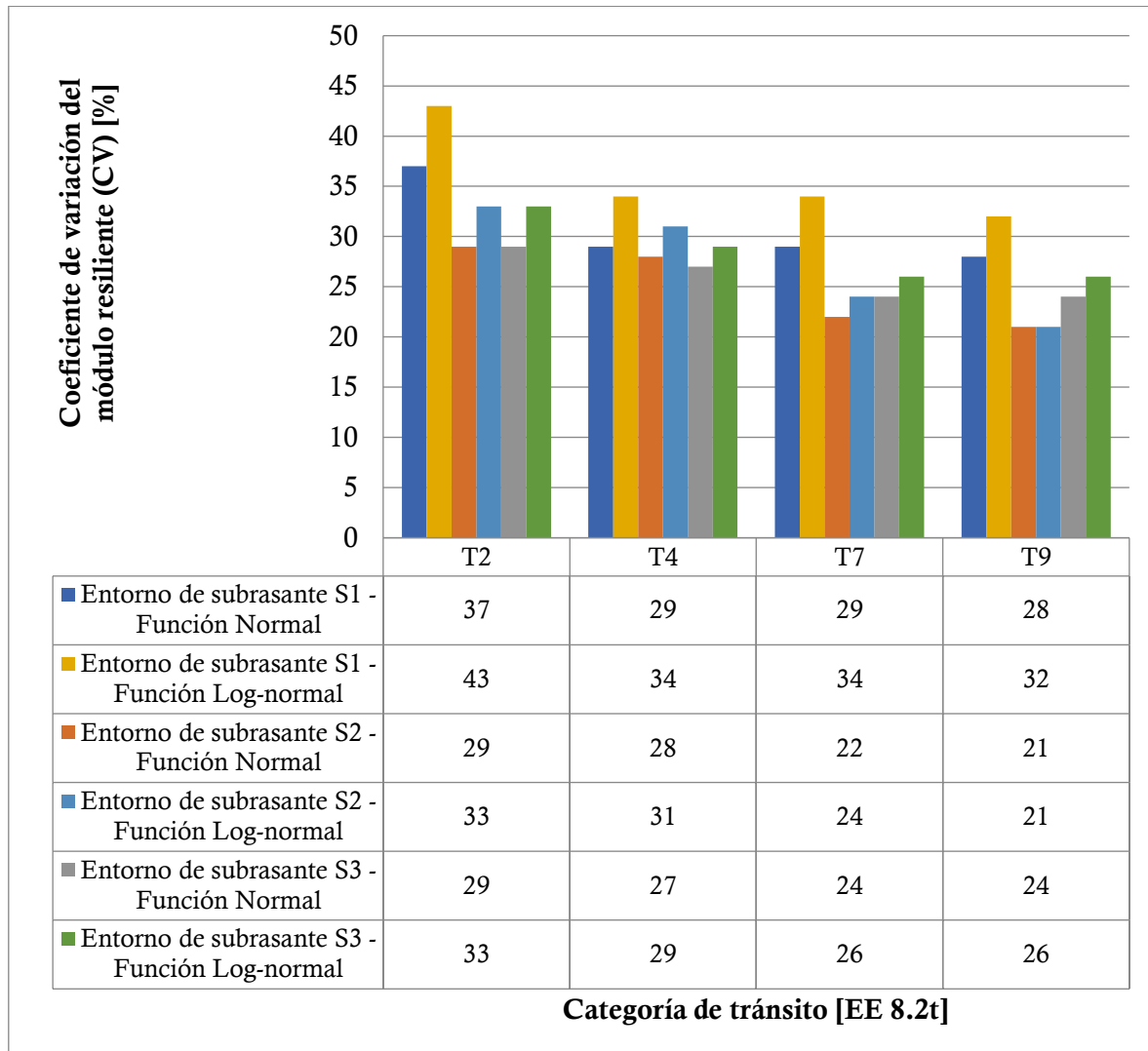


Figura 4-15. Comparación de los valores máximos del coeficiente de variación, del módulo resiliente, que garantiza una confiabilidad del 90% en el comportamiento mecánico de la estructura, para cada categoría de tránsito y entorno de subrasante, considerando las funciones de densidad normales y log-normales del módulo, en la región R4.

La **Figura 4-15** muestra que, para obtener una confiabilidad igual o mayor al 90% en las estructuras de pavimento establecidas por la *metodología INVIAS 1998*, empleando la función de densidad normal del módulo resiliente, los coeficientes de variación (CV) de la variable deben ser menores al rango comprendido entre 21% y 37% y los CV asociados a la función de densidad log-normal de la variable deben ser menores al rango establecido entre 21% y 43%. Estos resultados indican que para garantizar una confiabilidad igual o superior al 90%, la función de densidad log-normal del módulo resiliente admite coeficientes de variación mayores que la

función normal, para diversas combinaciones de entorno de subrasante y categoría de tránsito; en consecuencia, la función log-normal presenta mayor confiabilidad que la función normal.

Sin embargo, los valores de coeficientes de variación (CV) de diversas propiedades geotécnicas, reportados en el capítulo 2 (entre 2% y 240% a nivel internacional (K. Phoon et al., 1995; Uzielli et al., 2007), entre 1% y 53% en el Valle de Aburrá (J. Viviescas, 2016) y, particularmente, CV de módulos resilientes de suelos chilenos entre 8% y 66% (Rodríguez Moreno, 2014)), indican que los coeficientes de variación del módulo resiliente obtenidos previamente, para garantizar la condición de confiabilidad requerida por el *método INVIAS 1998*, son inferiores a los valores típicos de distintas propiedades geotécnicas reportados en la bibliografía consultada. Así, se incrementa la posibilidad que la variabilidad del módulo resiliente, de los suelos del Valle de Aburrá, se traduzca en coeficientes de variación del módulo superiores a los obtenidos, tanto por la función de densidad normal como la log-normal, generando mayor incertidumbre en la vida útil de los espesores de pavimento recomendados por la *metodología INVIAS 1998*, aumentando la probabilidad de tener estructuras que no puedan soportar la carga de diseño, es decir, estructuras que estén subdimensionadas.

En la *Figura 4-15* se obtuvo, igualmente, que las categorías de tránsito bajo (T2 y T4) admitieron coeficientes de variación del módulo resiliente mayores, respecto las categorías de tránsito alto (T7 y T9), para todos los entornos de subrasante evaluados, lo que se traduce en una condición de confiabilidad superior. Asimismo, las estructuras definidas en el tipo de suelo con características más desfavorables (S1) presentaron mayor confiabilidad que las estructuras asociadas a los tipos de suelos más resistentes (S2 y S3). En consecuencia, los espesores propuestos por la *metodología INVIAS 1998* generan mayores condiciones de confiabilidad a los rangos menores de cada categoría analizada (entorno de suelo y tránsito)

4.5 CONFIABILIDAD DE LAS ESTRUCTURAS

Se evaluó la confiabilidad de las estructuras calculando la probabilidad de falla, de los valores mínimos de carga, de cada rango de clasificación del tránsito establecido. Posteriormente, se comparó la confianza de cada estructura ($1 - p_f$) con el coeficiente de variación del módulo resiliente asociado. Además, se obtuvo el coeficiente de variación (CV) asociado a una confiabilidad del 90% establecida por la *metodología INVIAS 1998*, con el fin de validar los resultados obtenidos en el capítulo 4.4.

La *Figura 4-12* presenta el procedimiento efectuado para obtener la confiabilidad asociada al valor mínimo de carga, de función de densidad de falla específica

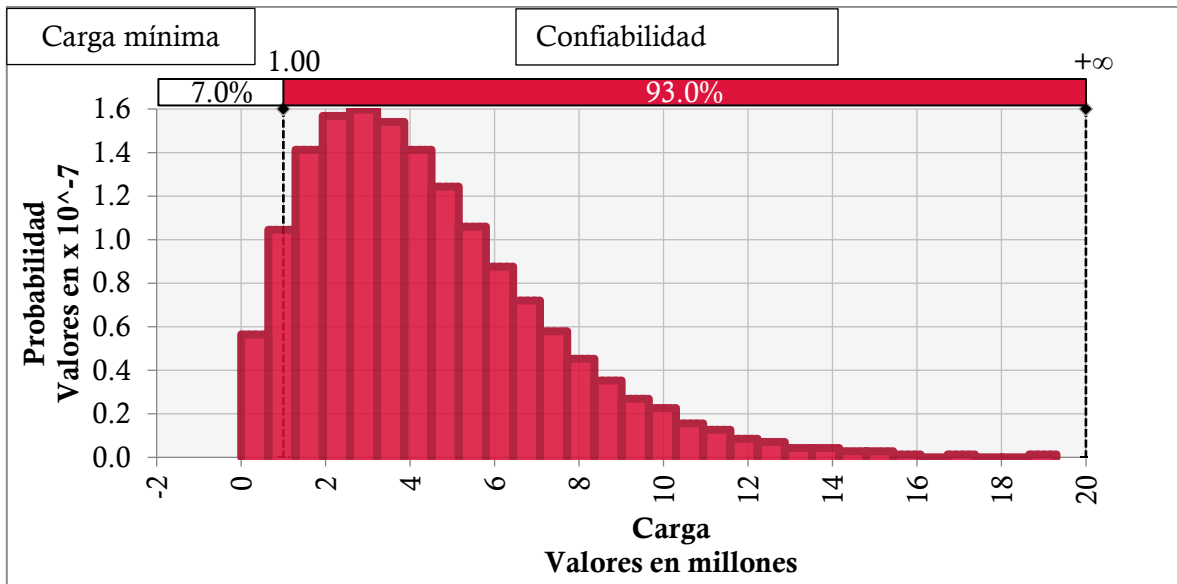


Figura 4-16. Función de densidad de falla R4-S1-T2-N-30%. Cálculo de la confiabilidad asociada a la carga mínima del rango de tránsito para una estructura de pavimento con el suelo más desfavorable (S1), el rango de tránsito menor (T2) y una función de densidad del módulo resiliente normal con un coeficiente de variación del módulo del 30%, en la región R4.

Como fue señalado en los subcapítulos 4.3 y 4.4, las tendencias estadísticas de las funciones de densidad de falla de las regiones R2 y R4 son similares, por lo cual el análisis de confiabilidad de las estructuras fue, igualmente, similar. A manera de ejemplo, se mostrarán los resultados obtenidos para la región R4, considerando que son igualmente replicables para la región R2

En la **Figura 4-17** y **Figura 4-18** se presentan los resultados obtenidos en el análisis de la confiabilidad establecida por la metodología INVIAS 1998 en la región R4, con base en funciones de densidad normal del módulo resiliente, de cada entorno de subrasante analizado. Adicionalmente, en la **Figura 4-19** se compararon las envolventes de confiabilidad asociadas a ambas funciones de densidad del módulo resiliente, es decir, la zona comprendida entre la estructura más confiable (tránsito y entorno de subrasante bajos y (T2 y S1)) y la estructura menos confiable (tránsito alto y entorno de subrasante medio (T9 y S2)), en ambos tipos de funciones de densidad del módulo.

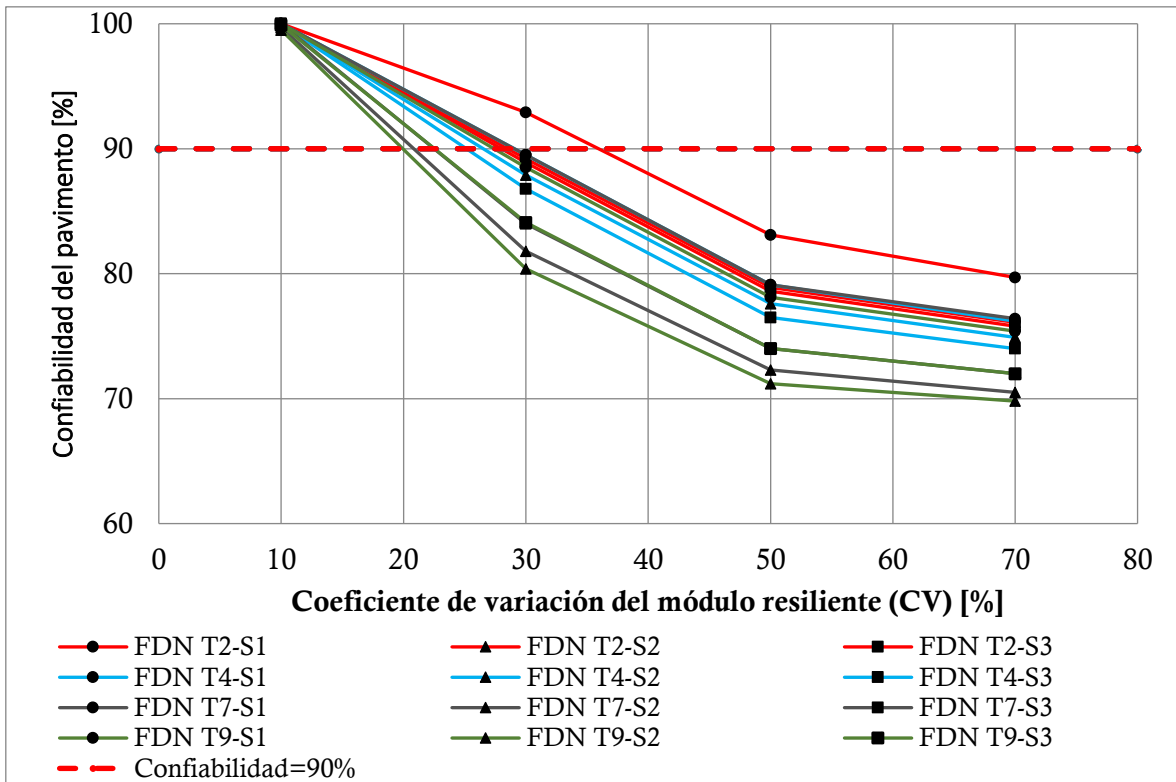


Figura 4-17. Confiabilidad de las estructuras de pavimento, considerando las funciones de densidad del módulo resiliente normal, para la región R4.

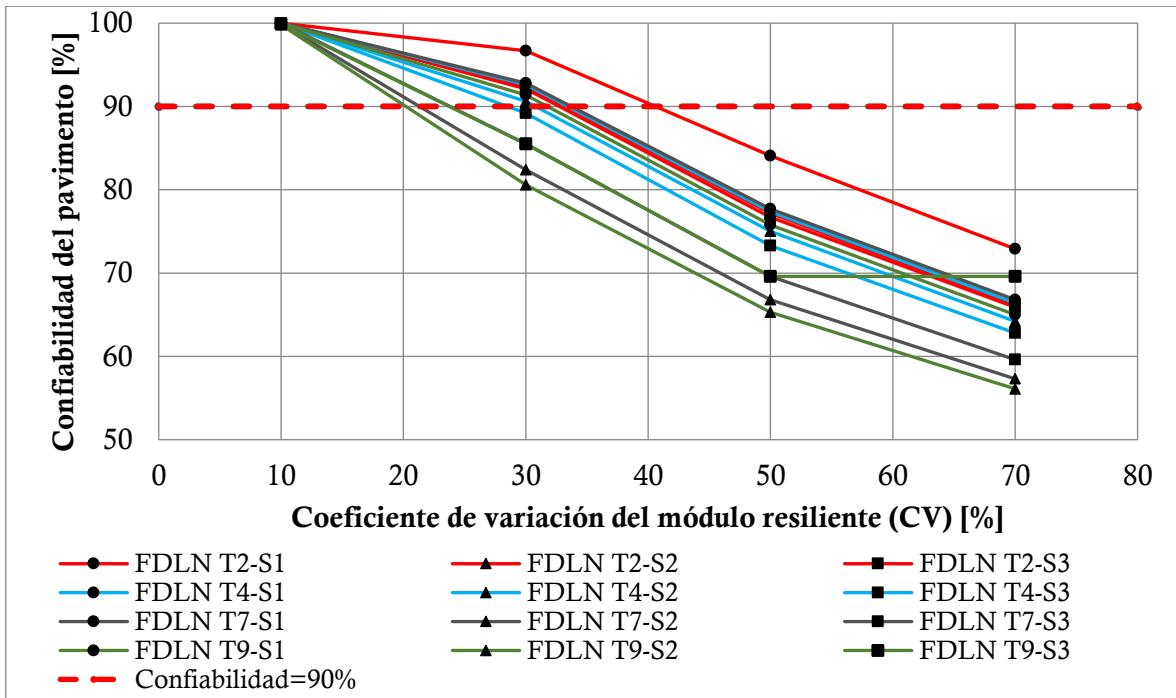


Figura 4-18. Confiabilidad de las estructuras de pavimento, considerando las funciones de densidad del módulo resiliente log-normal, para la región R4.

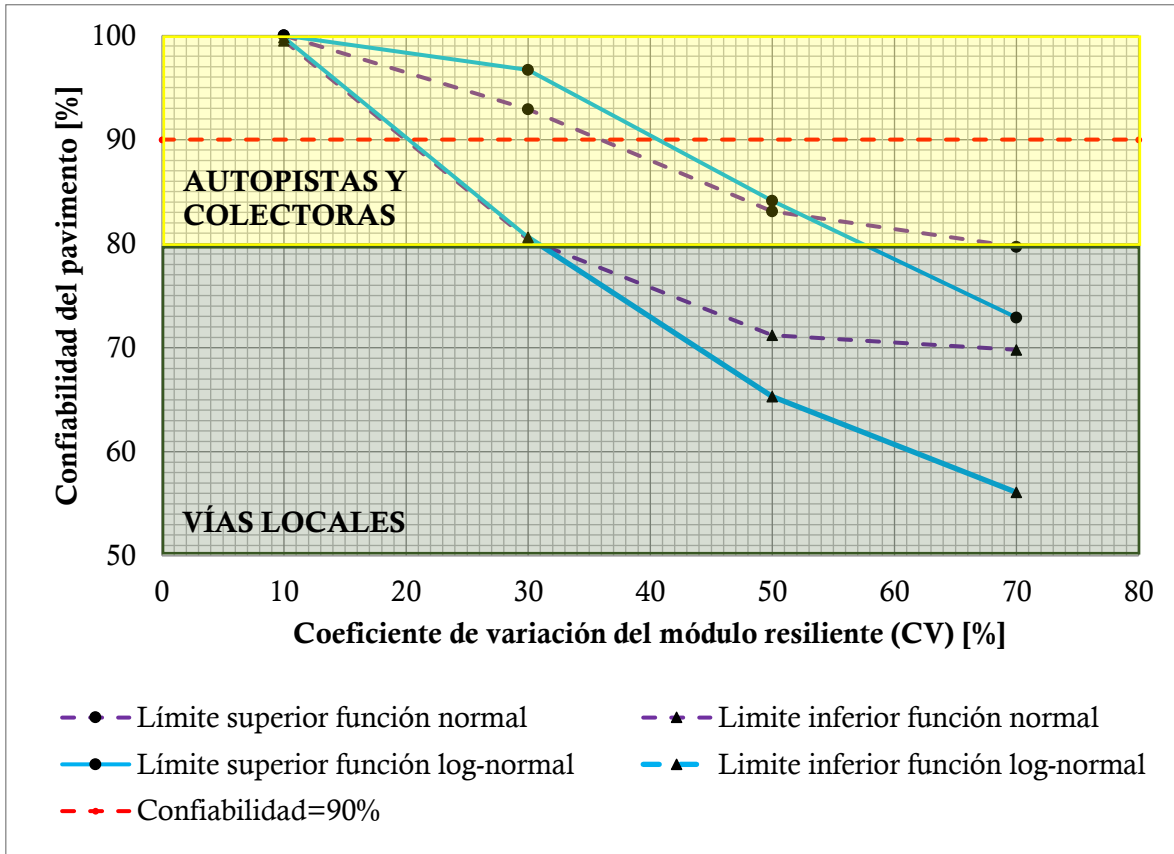


Figura 4-19. Comparación de las envolventes de confiabilidad de las estructuras de pavimento, asociada a las funciones de densidad del módulo resiliente normal y log-normal, para la región R4.

La **Figura 4-19** muestra que las estructuras asociadas a la función de densidad log-normal del módulo resiliente admiten coeficientes de variación (CV) del módulo mayores, respecto a la función de densidad normal, para una confiabilidad del pavimento superior al 82%, correspondiente a un rango de CV entre 28% y 53% para todas las estructuras analizadas. La función de densidad normal del módulo resiliente admite coeficientes de variación mayores, para confiabilidades de las estructuras de pavimento inferiores al 82%.

En la **Tabla 2.10**, el *método AASHTO-93* establece que la confiabilidad de las estructuras de las autopistas y vías arteriales principales (vías primarias) y de las vías colectoras (vías secundarias) debe ser superior a 75% en condición rural y 80% en condición urbana. Los resultados obtenidos demuestran que la función log-normal del módulo resiliente permite coeficientes de variación mayores de la propiedad, respecto a la función normal, garantizando las condiciones de confiabilidad requerida en las vías primarias y secundarias establecidas por el *Método*. Por otra parte, el rango de valores de coeficientes de variación (CV) del módulo resiliente que garantizan dicha confiabilidad (CV entre 28% y 53%) apenas alcanzan los resultados de propiedades geotécnicas del Valle de Aburrá (propiedades índices y N_{60}) obtenido por Viviescas (2016) (CV entre 1% y 52), siendo considerablemente menor a los CV de resistencia y ensayos del suelo obtenidos por Phoon et al. (1995) (CV entre 5% y 80% y entre 2% y 130%, respectivamente), de

propiedades geotécnicas medidas sobre el suelo reportados por Uzielli et al. (2007) (CV entre 6% y 240%) y de los módulos resilientes en suelos chilenos reportados por Rodríguez (2014) (CV entre 8% y 66%).

Es importante señalar que, aunque la función de densidad normal del módulo resiliente presenta mayor confiabilidad que la función log-normal en vías locales (confiabilidad requerida inferior al 80%, en la estructura), permitiendo mayores coeficientes de variación de la variable, los espesores de diseño utilizados para efectuar los modelos de densidad de falla de las estructuras (reportados en la **Tabla 3.4**) fueron obtenidos de la *metodología INVIAS 1998*, lo que implica que dichos pavimentos fueron concebidos para asumir la carga de vías secundarias (colectoras) y primarias (autopistas y arterias principales). En consecuencia, difícilmente las estructuras analizadas sean consideradas en el diseño y construcción de vías terciarias (vías locales).

Respecto el análisis de la confiabilidad del pavimento establecida por la *metodología INVIAS 1998* (90%), los coeficientes de variación asociados a cada función de densidad analizada se presentan en la **Figura 4-20**.

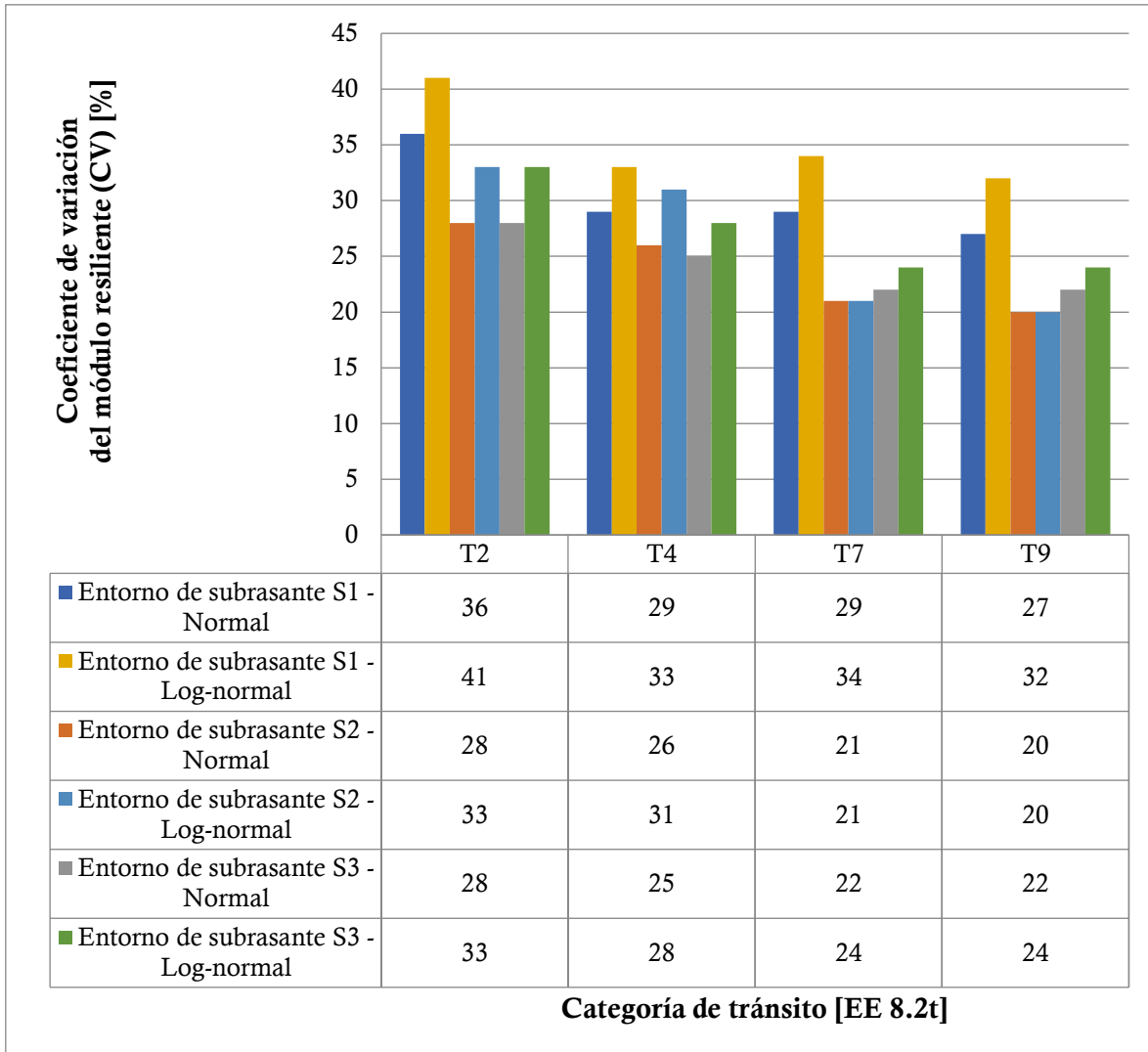


Figura 4-20. Comparación de los valores máximos del coeficiente de variación que garantiza una confiabilidad del 90%, en el comportamiento mecánico de la estructura, para cada categoría de tránsito y entorno de subrasante, considerando las funciones de densidad Normales y Log-normales del módulo resiliente, en la región R4.

La **Figura 4-20** muestra que, para obtener una confiabilidad igual o mayor al 90% en las estructuras de pavimento establecidas por la *metodología INVIAS 1998*, empleando la función de densidad normal del módulo resiliente, los coeficientes de variación (CV) de la variable deben ser menores al rango comprendido entre 20% y 36% y los CV asociados a la función de densidad log-normal de la variable deben ser menores al rango establecido entre 20% y 41%. Esto valida los resultados obtenidos en la **Figura 4-15**, donde la función de densidad log-normal del módulo resiliente admitió coeficientes de variación mayores que la función normal, para la confiabilidad establecida, y los coeficientes de variación del módulo resiliente obtenidos son inferiores a los valores típicos de distintas propiedades geotécnicas reportados en la bibliografía consultada, a nivel nacional e internacional.

4.6 DISCUSIONES Y CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO

- El análisis estadístico y probabilístico de las funciones de densidad de falla, de cada estructura de pavimento evaluada, demostró que tanto las tipologías de las funciones de densidad, como las condiciones de confiabilidad obtenidas, fueron similares para ambas regiones analizadas (regiones R2 y R4 de la *Tabla 2.5*), bajo entornos de subrasante, categorías de tránsito y coeficientes de variación iguales, ya que las únicas variables que presentaron valores distintos entre las regiones fueron los coeficientes de drenaje (m_i) de los materiales granulares (1.0 para la región R2 y 0.9 para la región R4) y los espesores de las estructuras de pavimento propuestos por la *metodología INVIAS 1998* que, según la *Tabla 3.4*, varían entre 0 cm y 10.0 cm para categorías de tránsito y entornos de subrasante iguales, entre ambos tipos de regiones.
- Todos los tipos de funciones de falla calculados tienen como base estadística el *Modelo Exponencial*: Gamma, Weibull, BetaGeneral y Log-Normal, siendo un resultado matemáticamente concordante con la función de transformación básica de la *ecuación AASHTO-93* (función logarítmica) (*Ecuación 2-17*), generando una tendencia de tener probabilidades de falla altas para valores de carga bajos.
- Las estructuras evaluadas con la función de densidad normal del módulo resiliente garantizaron la condición de confiabilidad del 90% en las estructuras, establecida por la *metodología INVIAS 1998*, para coeficientes de variación (CV) máximos del módulo que oscilan entre 21% y 37%, en ambas regiones analizadas. Asimismo, las estructuras evaluadas con la función log-normal permitieron cumplir dicha confiabilidad para CV máximos entre 21% y 43%, en ambas regiones del proyecto. En consecuencia, la función log-normal del módulo resiliente admite CV, de la propiedad, mayores a los CV de la función normal, lo que representa una condición de confiabilidad mayor, considerando los alcances establecidos por la *metodología INVIAS 1998*.
- Las estructuras asociadas a la función de densidad log-normal del módulo resiliente admitieron coeficientes de variación (CV) mayores, respecto a la función de densidad normal, para vías primarias (autopistas y arterias) y secundarias (colectoras), a partir de un rango de CV máximos entre 28% y 53%, en todas las estructuras analizadas. Las funciones de densidad normal del módulo resiliente permitieron coeficientes de variación mayores para estructuras asociadas a vías terciarias (locales), con la salvedad que los pavimentos analizados no son comúnmente implementados en este tipo de vías.
- Los espesores propuestos por la *metodología INVIAS 1998* generaron mayores condiciones de confiabilidad para los rangos menores de cada categoría analizada (entorno de suelo y tránsito). Las estructuras asociadas a los suelos con mejores propiedades (S2 y S3) y cargas de tránsito altas (T7 y T9) admitieron menores coeficientes de variación (CV) del módulo resiliente. En consecuencia, las condiciones de baja variabilidad del módulo pueden aumentar la probabilidad de falla de dichas estructuras.
- Los coeficientes de variación (CV) del módulo resiliente que garantizaron la confiabilidad de las estructuras de la *metodología INVIAS 1998* (CV máximos entre 21% y 37% para funciones de densidad normales del módulo y entre 21% y 43% para funciones log-normales), e incluso aquellos que garantizan la confiabilidad establecida por el *método AASHTO-93* para vías primarias y secundarias (CV máximos entre 28% y

53% para funciones de densidad log-normales), presentan valores posibles considerablemente inferiores a los CV de propiedades y ensayos geotécnicos investigados en la bibliografía nacional e internacional, incluyendo los resultados de propiedades geotécnicas del Valle de Aburrá (propiedades índices y N_{60}) obtenido por Viviescas (2016) (CV entre 1% y 52) y los módulos resilientes en suelos chilenos reportados por Rodríguez Moreno (2014) (CV entre 8% y 66%).

- En consecuencia, y reconociendo que no hay modelos referenciados de la variabilidad del módulo resiliente de los suelos el Valle de Aburrá, existe la posibilidad que las estructuras evaluadas no sean confiables para escenarios de tránsito alto (categorías T7 y T9) y entornos de subrasante favorables (categorías S2 y S3), según la confiabilidad establecida por el *método AASHTO-93*, y que sea difícil garantizar la confiabilidad del 90% (*metodología INVIAS 1998*) en todas las estructuras, inclusive para las condiciones de subrasante más desfavorables (categoría S1) y las cargas de tránsito más bajas (categorías T1 y T2) que fueron las que mayores valores de coeficiente de variación del módulo presentaron.

5 CONCLUSIONES FINALES E INVESTIGACIONES FUTURAS

5.1 CONCLUSIONES FINALES POR CAPÍTULO

5.1.1 Marco de referencia

- Los cálculos estructurales de la *metodología INVIAS 1998*, documento de diseño de pavimentos flexibles vigente en Colombia, están basados en el *método AASHTO-93*.
- Las funciones de densidad tipo Normal y Log-normal son frecuentemente utilizadas en la modelación de la variabilidad de las propiedades geotécnicas del suelo a nivel nacional e internacional.
- El coeficiente de variación es un estadístico que permite analizar la magnitud e incidencia de una, o múltiples variables geotécnicas, en un proceso físico o mecánico que impacte el suelo, cuantificando la incertidumbre asociada a dichas variables. Con base en la bibliografía consultada, los coeficientes de variación de las propiedades índices del suelo reportados pueden llegar hasta 240%, de la resistencia hasta 80%, de ensayos “in situ” hasta 130% y, específicamente del módulo resiliente hasta 70%.

5.1.2 Zona de estudio y variables de diseño

- El Valle de Aburrá está enmarcado en tres (3) regiones climatológicas según la *metodología INVIAS 1998*. El 64.63% del territorio se encuentra en la región R4, el 33.51% se encuentra en la región R2 y el 1.86% se encuentra en la región R5. En este proyecto se estudiaron y analizaron las regiones R4 y R2 (*Tabla 2.5*), abarcando el 98.14% del área de influencia.
- Las funciones de densidad definidas en el proyecto para modelar la incertidumbre del módulo resiliente, establecido por el rango de variación cada entorno de subrasante, fueron tipo Normal y tipo Log-Normal, debido a su pertinencia en la modelación de propiedades geotécnicas y el acople estadístico con los rangos (límite menor y límite mayor) de cada entorno indicado.
- La probabilidad de obtener valores del módulo resiliente inferiores, al valor del rango mínimo establecido por la *metodología INVIAS 1998*, es mayor al aumentar el coeficiente de variación (CV) del módulo. Asimismo, dicha probabilidad es menor para las funciones de densidad normal del módulo resiliente, respecto las funciones log-normales, para valores de CV superiores al 10%.

5.1.3 Modelación y análisis estadístico

- Las tipologías de las funciones de densidad y las condiciones de confiabilidad obtenidas fueron similares para ambas regiones analizadas (regiones R2 y R4 de la *Tabla 2.5*), bajo entornos de subrasante, categorías de tránsito y coeficientes de variación iguales.
- Todos los tipos de funciones de falla calculados tienen como base estadística el *Modelo Exponencial*, en ambas regiones de análisis. Esto es concordante con la función de transformación básica de la *ecuación AASHTO-93* (función logarítmica) (*Ecuación 2-17*), generando una tendencia de tener probabilidades de falla altas para valores de carga bajos.
- Las estructuras evaluadas con la función de densidad normal del módulo resiliente garantizaron la condición de confiabilidad del 90% en las estructuras, establecida por la *metodología INVIAS 1998*, para coeficientes de variación (CV) máximos entre 21% y 37%, en ambas regiones analizadas. Asimismo, las estructuras evaluadas con la función log-normal permitieron cumplir dicha confiabilidad para CV máximos entre 21% y 43%. En consecuencia, la función log-normal del módulo resiliente admite CV, de la propiedad, mayores a los CV de la función normal, lo que representa una condición de confiabilidad mayor, considerando los alcances establecidos por la *metodología INVIAS 1998*.
- Con base en la confiabilidad estructural establecida por el *método AASHTO-93*, las estructuras asociadas a la función de densidad log-normal del módulo resiliente admitieron coeficientes de variación (CV) mayores, respecto a la función de densidad normal, para vías primarias (autopistas y arterias) y secundarias (colectoras), considerando un rango de CV máximos entre 28% y 53%, en todas las estructuras analizadas.
- Los espesores propuestos por la *metodología INVIAS 1998* generaron mayores condiciones de confiabilidad para los rangos menores de cada categoría analizada (entorno de suelo y tránsito). Las estructuras asociadas a los suelos con mejores propiedades (S2 y S3) y cargas de tránsito altas (T7 y T9) admitieron menores coeficientes de variación (CV) del módulo resiliente. En consecuencia, las condiciones requeridas de bajas incertidumbre en el módulo resiliente pueden aumentar la probabilidad de falla de dichas estructuras.
- Los coeficientes de variación (CV) del módulo resiliente que garantizaron la confiabilidad de las estructuras de la *metodología INVIAS 1998* (CV máximos entre 21% y 37% para funciones de densidad normales del módulo y entre 21% y 43% para funciones log-normales), y los que garantizan la confiabilidad establecida por el *método AASHTO-93* para vías primarias y secundarias (CV máximos entre 28% y 53% para funciones de densidad log-normales), presentan valores considerablemente inferiores a los CV de propiedades y ensayos geotécnicos investigados en la bibliografía nacional e internacional. Por ello, existe la posibilidad que las estructuras evaluadas no alcancen su vida útil para escenarios de tránsito alto (categorías T7 y T9) y entornos de subrasante favorables (categorías S2 y S3), y que sea difícil garantizar la confiabilidad del 90% (*metodología INVIAS 1998*) en todos los pavimentos, inclusive para las condiciones de subrasante más desfavorables (categoría S1) y las cargas de tránsito más bajas (categorías T1 y T2) que fueron las que mayores valores de coeficiente de variación del módulo resiliente presentaron.

5.2 CONCLUSIÓN FINAL

La función de densidad log-normal del módulo resiliente representa mayores condiciones de confiabilidad, que la normal, para las estructuras de pavimento asfáltico de vías primarias (autopistas y arterias) y secundarias (colectoras) analizadas, admitiendo coeficientes de variación máximos (CV) del módulo entre 28% y 53%. Sin embargo, este rango apenas alcanza los CV obtenidos en la medición de distintas propiedades geotécnicas en el Valle de Aburrá y es considerablemente menor a los CV de propiedades obtenidas a nivel internacional, incluyendo mediciones del módulo resiliente en diferentes suelos de subrasante. Esto implica que las estructuras asociadas a los coeficientes de variación del módulo resiliente menores, dentro del rango establecido, tengan altas posibilidad de fallar antes de asumir toda la carga de servicio, en consecuencia, los espesores son insuficientes para garantizar las condiciones de confiabilidad exigidas.

5.3 INVESTIGACIONES FUTURAS

Este proyecto es un acercamiento de los modelos estadísticos de cálculo y medición de la variabilidad del módulo resiliente y su incidencia en la confiabilidad de las estructuras de pavimento diseñadas por el *método AASHTO-93* en el Valle de Aburrá, considerando estructuras calculadas y recomendadas por el Ministerio de Transportes de Colombia con dicho método. Sin embargo, es necesario iniciar las siguientes investigaciones.

Caracterización y evaluación de la variabilidad de los módulos resilientes de los suelos superficiales del Valle de Aburrá: Es necesario hacer una recopilación y depuración de los módulos resilientes medidos en los diseños de pavimentos realizados en el Valle de Aburrá, con el fin de caracterizar e identificar la variabilidad de la propiedad. En otras palabras, se hace necesario el cálculo de funciones de densidad del módulo resiliente para suelos de la zona de estudio.

Caracterización y evaluación de la variabilidad de los módulos resilientes de los suelos problemáticos en Colombia: Montejo (2006, p. 81) señala que los suelos problemáticos en Colombia son los arcillosos blandos compresibles, los orgánicos, los volcánicos y los expansivos. En particular, estos son suelos de cimentación de estructuras de pavimentos típicos en Colombia. Se propone efectuar procesos de investigación y análisis de la variabilidad de los parámetros geotécnicos y mecánicos sobre estos suelos, en todo el territorio nacional. Los resultados de esta investigación podrán emplearse en la aplicación de modelos de estabilización de cada tipo de suelo, o bien en modelos de diseño por confiabilidad de estructuras de pavimento

Caracterización y evaluación de la variabilidad de los materiales de construcción de pavimentos en Colombia: En línea con la anterior investigación, es necesario hacer un estudio de variabilidad de las propiedades geotécnicas de los materiales de construcción de los pavimentos en Colombia. Actualmente, las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras del Ministerio de Transporte presentan caracterizaciones determinísticas y no probabilísticas, dificultando la aplicación de los modelos de confiabilidad en el diseño y en la construcción de los pavimentos.

Análisis y evaluación de la confiabilidad de estructuras diseñadas por métodos mecanísticos – racionales: Como una segunda etapa de las investigaciones propuestas, se propone efectuar

Título: Análisis por confiabilidad del modelo de diseño AASHTO-93 para pavimentos flexibles en el Valle de Aburra.

evaluaciones de confiabilidad de estructuras diseñadas por métodos mecanísticos – racionales, considerando la variabilidad de las propiedades geotécnicas y mecánicas de los suelos y los materiales de las estructuras de pavimento flexibles en el Valle de Aburrá y en Colombia, como el producto de las investigaciones previamente planteadas.

Revisión con modelos de confiabilidad de las estructuras de los manuales de diseño del Instituto Nacional de Vías (INVIAS) en Colombia: Los resultados obtenidos en este proyecto definitivamente estimulan la necesidad de evaluar todas las estructuras de pavimentos flexibles y rígidos, de los manuales de diseño del INVIAS, bajo criterios de confiabilidad. Con ello, se podría validar las dimensiones, y proponer ajustes en caso de ser necesario, para que se garantice la confianza establecida por cada manual.

6 BIBLIOGRAFÍA

- A.M.V.A. (2006). *Microzonificación sísmica detallada de los municipios de Barbosa, Girardota, Copacabana, Sabaneta, La Estrella, Caldas y Envigado*. Medellín: Área Metropolitana del Valle de Aburra.
- AASHTO. (1993). *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*. Washington: American Association of State Highway.
- Asphalt Institute. (1982). *Research and Development of the Asphalt Institute's Thickness Design Manual*. (1982 Asphalt Institute, Ed.) (9th ed.).
- Baecher, G., & Christian, J. (2003). *Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering*. John Wiley and Sons Ltd (Vol. 1). <https://doi.org/10.1198/tech.2005.s838>
- CLIMATE-DATA.ORG. (2018). Datos Climáticos Mundiales. Retrieved from <https://es.climate-data.org/>
- Crespo, C. (2002). *Confiabilidad Del Diseño En Geotecnia*.
- Dilip, D. M., Ravi, P., & Babu, G. L. S. (2013). System Reliability Analysis of Flexible Pavements. *Journal of Transportation Engineering*, 139(10), 1001–1009. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000578](https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000578)
- Dilip, D. M., & Sivakumar Babu, G. L. (2013). Methodology for Pavement Design Reliability and Back Analysis Using Markov Chain Monte Carlo Simulation. *Journal of Transportation Engineering*, 139(1), 65–74. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000455](https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000455)
- Folayan, J. I., Hoeg, K., & Benjamin, J. R. (1970). DECISION THEORY APPLIED TO SETTLEMENT PREDICTIONS. *Journal of Soil Mechanics & Foundations Div*, 96, 1127–1141. Retrieved from <https://trid.trb.org/view/127463>
- Gharaybeh, F. ., Masaeid, H. ., & Taleb, M. (1998). Parametric Sensitivity Study of the AASHTO Flexible Pavement Design Equation. *Journal of the Institution of Engineers (India)*, 78(4), 175–179.
- Green, J., & Hall, J. (1975). Nondestructive Vibratory Testing of Airport Pavements. Volume 1. Experimental Test Results and Development of Evaluation Methodology and Procedure. Retrieved from <http://www.dtic.mil/docs/citations/ADA017511>
- Heukelom, W., & Foster, C. R. (1960). Dynamic testing of pavements. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 1–28.
- Höeg, K., & Murarka, R. (1974). Probabilistic Analysis and Design of a Retaining Wall. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 349–366. Retrieved from <http://cedb.asce.org/CEDBsearch/record.jsp?dockkey=0022181>
- Hu, S., Zhou, F., Scullion, T., & Leidy, J. (2014). Reliability-Based Mechanistic-Empirical Flexible Pavement Design. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2456, 85–95. <https://doi.org/10.3141/2456-09>
- INVIAS y Ministerio de Transporte de Colombia. (1998). *Manual de Diseño de pavimentos Asfálticos en vías con medios y altos volúmenes de tránsito*. Popayan.
- INVIAS y Ministerio de Transporte de Colombia. (2013). *Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras 2013*.
- Kalita, K., & Rajbongshi, P. (2015). Variability characterisation of input parameters in pavement performance evaluation. *Road Materials and Pavement Design*, 16(1), 172–185. <https://doi.org/10.1080/14680629.2014.988171>
- Kim, H., & Board, N. B. (2003). Reliability-based pavement design model accounting for inherent variability of design parameters. Retrieved from <https://pdfs.semanticscholar.org/80c3/b893041d370d0f3717d9861c14acfb1fdd52.pdf>
- Lacasse, S., & Nadim, F. (1998). Risk and Reliability in Geotechnical Engineering. *International*

- Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*. Retrieved from <http://scholarsmine.mst.edu/icchge/4icchge/4icchge-session00/11>
- Lister, N. W., & Powell, W. D. (1987). DESIGN PRACTICE FOR BITUMINOUS PAVEMENTS IN THE UNITED KINGDOM. *Transport Safety & Security*, 220–231. Retrieved from <https://trid.trb.org/view/242526>
- Luo, Z., Xiao, F., & Sharma, R. (2014). Efficient reliability-based approach for mechanistic-empirical asphalt pavement design. *Construction and Building Materials*, 64, 157–165. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2014.04.071>
- Mattos, A. (2015). *Diseño por confiabilidad de zapatas sobre suelos arenosos utilizando el método de Monte Carlo*.
- Ministerio de las TIC. (2018). Datos Abiertos Gobierno Digital Colombia. Retrieved from <https://www.datos.gov.co/>
- Monismith, C. L., Epps, J. A., Kasianchuk, D. A., & McLean, D. B. (1970). *ASPHALT MIXTURE BEHAVIOR IN REPEATED FLEXURE*. Washington: Berkeley, CA. Retrieved from <https://trid.trb.org/view/94444>
- Montejo Fonseca, A. (2006). *Ingeniería de pavimentos* (Tercera). Bogotá: Universidad Católica de Colombia. Retrieved from http://www.redbiblioucacue.com/opac_css/index.php?lvl=notice_display&id=32254
- Montgomery, D., & Runger, G. (2002). *Probabilidad y estadística aplicadas a la ingeniería* (2nd ed.). México: LIMUSA.
- MOP. (2004). *Ministerio de Obras Públicas de Chile*.
- Myre, J. (1992). Fatigue of Asphalt Materials for Norwegian Conditions. *Seventh International Conference on Asphalt Pavements*, 3.
- Palisade Corporation, . (2013). Guía para el uso de @RISK: Programa de complemento para el análisis y simulación de riesgos en Microsoft® Excel. Ithaca: Palisade Corporation.
- Phoon, K.-K., & Kulhawy, F. H. (1999). Characterization of geotechnical variability. *Canadian Geotechnical Journal*, 36(4), 612–624. <https://doi.org/10.1139/t99-038>
- Phoon, K. (2008). *Reliability-based design in geotechnical engineering : computations and applications*. Taylor & Francis.
- Phoon, K., Kulhawy, F., & Grigoriu, M. (1995). *Reliability-based design of foundations for transmission line structures (Report TR-105000)*. Electric Power Research Institute.
- Poulsen, A., & Stubstad, R. N. (1980). Fastlæggelse af E-moduler for Underbundsmaterialer ved Målinger i Marken.
- Powell, W., Potter, J., Mayhew, H., & Nunn, M. (1984). The structural design of bituminous roads. *Transport Safety & Security*. Retrieved from <https://trid.trb.org/view/211702>
- Quiroga, D., & Quiroz, L. (2012). *Generación de ayudas para el uso del software MEPDG en el dimensionamiento de pavimentos*. Universidad Industrial de Santander.
- Rendon, D., Toro, G., & Hermelin, M. (2006). Modelo Cronoestratigráfico para el Emplazamiento de los Depósitos de Vertiente en el Valle de Aburra. *Ciencias de La Tierra*, 16.
- Reyes Lizcano, F. A. (2003). *Diseño racional de pavimentos*. CEJA. Retrieved from <http://www.sidalc.net/cgi-bin/wxis.exe/?IsisScript=UCC.xis&method=post&formato=2&cantidad=1&expresion=mfn=079424>
- Rodríguez, M., Thenoux, G., & González, Á. (2016). Probabilistic assessment of asphalt pavement design Determinación probabilística del tiempo de servicio de estructuras de pavimentos. *Portal.Ondac.Com*, 31. Retrieved from https://portal.ondac.com/601/articulos-70276_recurso_1.pdf
- Rodríguez Moreno, M. A. (2014). *Determinación de la confiabilidad implícita en el método de diseño*

- estructural de pavimentos flexibles AASHTO-93 en base a modelos de predicción del deterioro*. Pontificia Universidad Católica de Chile. Retrieved from <https://repositorio.uc.cl/handle/11534/16571>
- Rondon, H., & Reyes, F. (2015). *Pavimentos-Materiales, Construcción y Diseño* (Primera). Bogotá: ECOE Ediciones. Retrieved from https://www.researchgate.net/profile/Reyes_Fredy/publication/299484649_Pavimentos_Materiales_construccion_y_diseno/links/56fad0208ae1b40b804d748/Pavimentos-Materiales-construccion-y-diseno
- Rondón Quintana, H. A., Reyes Lizcano, F. A., González Ortiz, L. A., & Vásquez Ardila, S. E. (2012). *Ahuellamiento y fatiga en mezclas asfálticas*. Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Retrieved from <http://udistrital.edu.co/novedades/particularNews.php?Type=P&idNovedad=3846>
- Shell International Petroleum Company, Ltd. (1978). *Shell pavement design manual asphalt pavements and overlays for road traffic*. (1st ed.). Londres: Shell International Petroleum.
- Thyagarajan, S., Muhunthan, B., Sivanesar, N., & Petros, K. (2011). Efficient Simulation Techniques for Reliability Analysis of Flexible Pavements Using the Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide. *Journal of Transportation Engineering*, 137(11), 796–804. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000272](https://doi.org/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000272)
- Ullidtz, P. (1977). OVERLAY AND STAGE BY STAGE DESIGN, 1, 722–735. Retrieved from <https://trid.trb.org/view/60973>
- Uzan, J., Ishai, I., Hoffman, M., Wiseman, G., & Livneh, M. (1977). *Application of elasticity models for evaluation of flexible pavements*.
- Uzielli, M., Lacasse, S., & Nadim, F. (2007). Soil variability analysis for geotechnical practice. *Characterisation and Engineering Properties of Natural Soils*, 1653–1754. Retrieved from <https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=-4O9BwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA1653&dq=Soil+Variability+Analysis+for+Geotechnical+Practice+Characterisation+and+Engineering+Properties+of+Natural+Soils+Uzielli+%222007%22&ots=toMWdoXuOE&sig=kJDHZSkRyXyMYhWtSW5RsMvX>
- Viviescas, J. (2016). *Evaluación de la variabilidad de las propiedades de resistencia al esfuerzo cortante para Flujos de Lodos y Residuales (saprolito) del Valle de Aburrá partir de ensayos de penetración estándar (SPT)*. Universidad de Antioquia.
- Viviescas, J. C., Osorio, J. P., & Cañón, J. E. (2017). Reliability-based designs procedure of earth retaining walls in geotechnical engineering. *Obras y Proyectos*, (22), 50–60. <https://doi.org/10.4067/S0718-28132017000200050>

7 ANEXO 1: FUNCIONES DE DENSIDAD DEL MÓDULO RESILIENTE

7.1 FUNCIONES DE DENSIDAD DE CADA ENTORNO DE SUBRASANTE

En la *Figura 7-1*, *Figura 7-2*, *Figura 7-3*, *Figura 7-4*, *Figura 7-5* y *Figura 7-6* se presentan las funciones de densidad normal y log-normal del módulo resiliente, de cada entorno de subrasante, considerando cada coeficiente de variación (CV) de la propiedad.

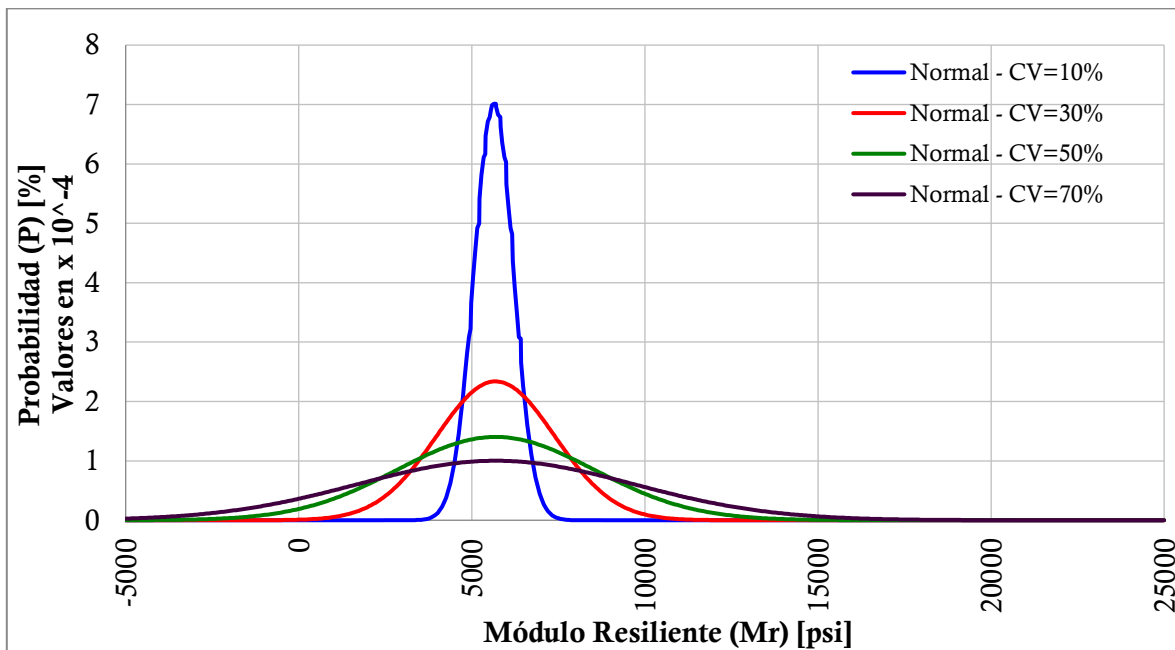


Figura 7-1. Función de densidad normal del módulo resiliente para suelos tipo S1 (Convenciones de funciones: CV=10% - línea azul, CV=30% - línea roja, CV=50% - línea verde, CV=70% - línea morada).

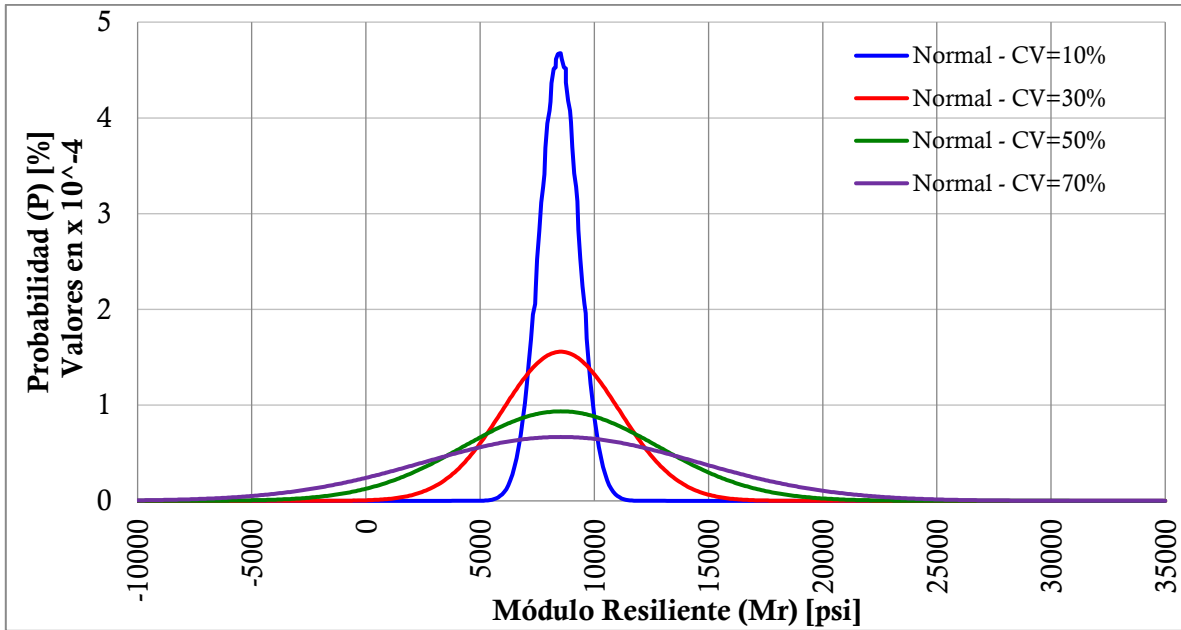


Figura 7-2. Función de densidad normal del módulo resiliente para suelos tipo S2 (Convenciones de funciones: CV=10% - línea azul, CV=30% - línea roja, CV=50% - línea verde, CV=70% - línea morada).

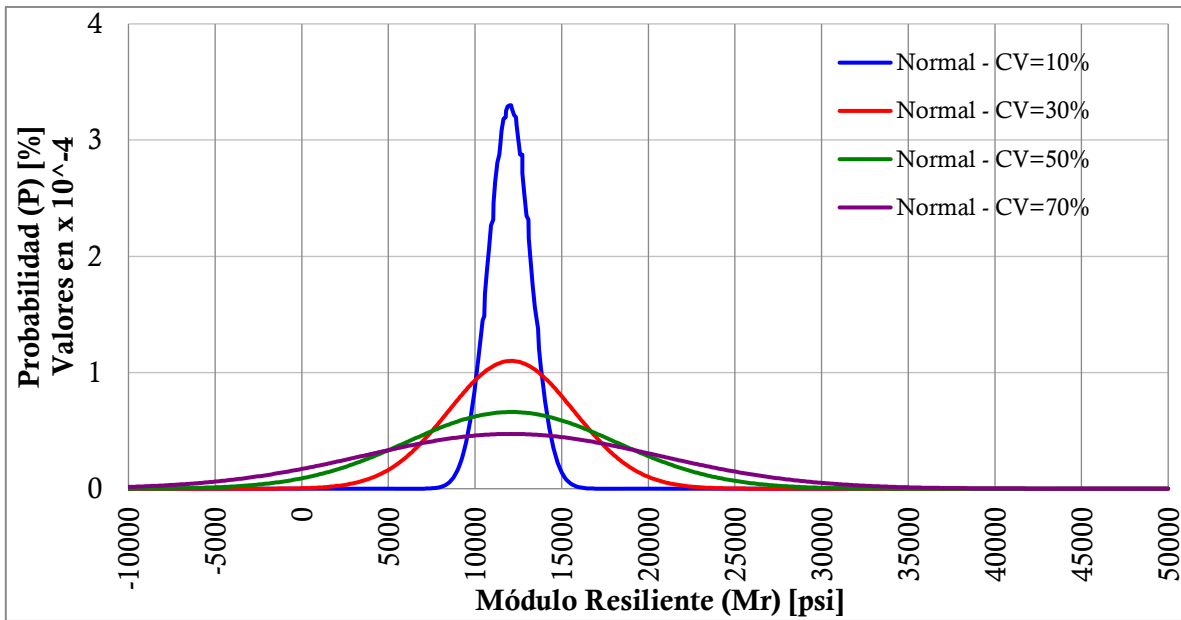


Figura 7-3. Función de densidad normal del módulo resiliente para suelos tipo S3 (Convenciones de funciones: CV=10% - línea azul, CV=30% - línea roja, CV=50% - línea verde, CV=70% - línea morada).

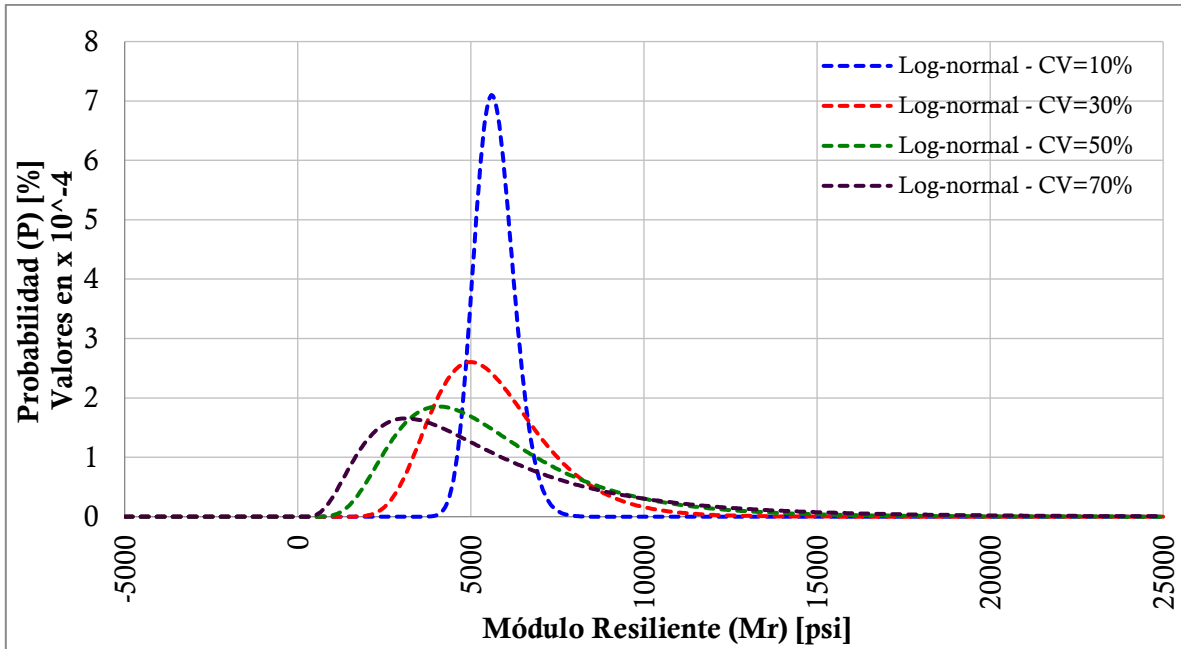


Figura 7-4. Función de densidad log-normal del módulo resiliente para suelos tipo S1 (Convenciones de funciones: CV=10% - línea azul, CV=30% - línea roja, CV=50% - línea verde, CV=70% - línea morada).

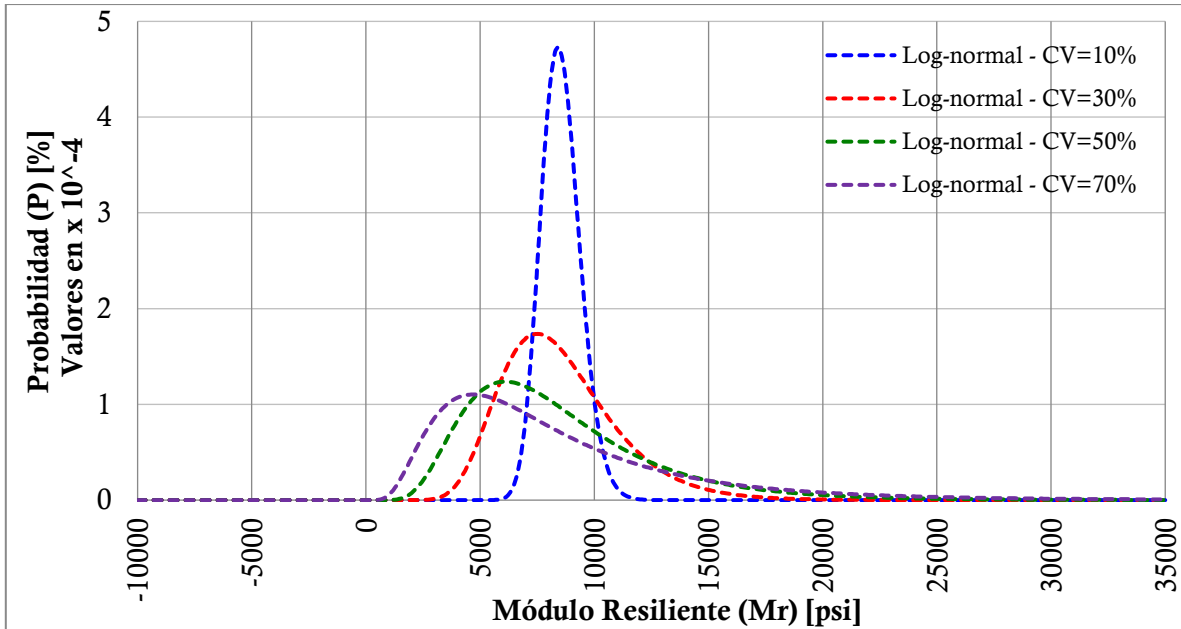


Figura 7-5. Función de densidad log-normal del módulo resiliente para suelos tipo S2 (Convenciones de funciones: CV=10% - línea azul, CV=30% - línea roja, CV=50% - línea verde, CV=70% - línea morada).

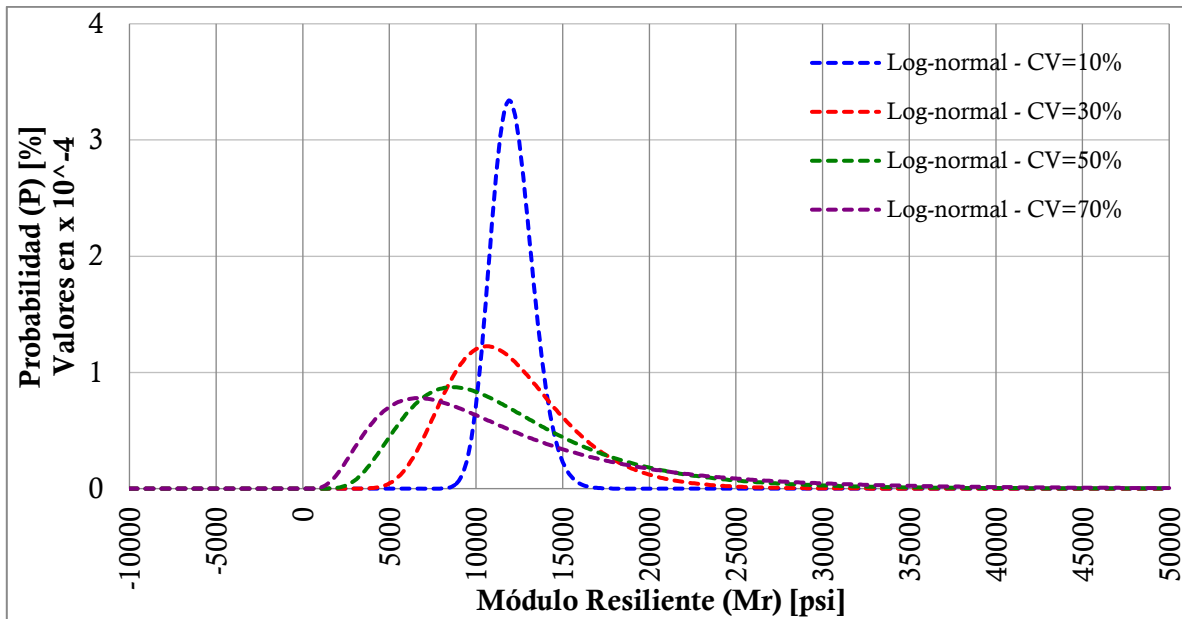


Figura 7-6. Función de densidad log-normal del módulo resiliente para suelos tipo S3 (Convenciones de funciones: CV=10% - línea azul, CV=30% - línea roja, CV=50% - línea verde, CV=70% - línea morada).

7.2 RELACIONES ESTADÍSTICAS

Se presentan las relaciones entre el coeficiente de variación (CV) del módulo resiliente (Mr) con la probabilidad que Mr sea menor al rango mínimo establecido por la metodología INVIAS 1998 (RM) y con la probabilidad que la mediana del módulo resiliente ($p(\text{Me})$), para todos los entornos de subrasante, considerando ambas funciones de distribución, en la *Figura 7-7*, *Figura 7-8*, *Figura 7-9*, *Figura 7-10*, *Figura 7-11* y *Figura 7-12*.

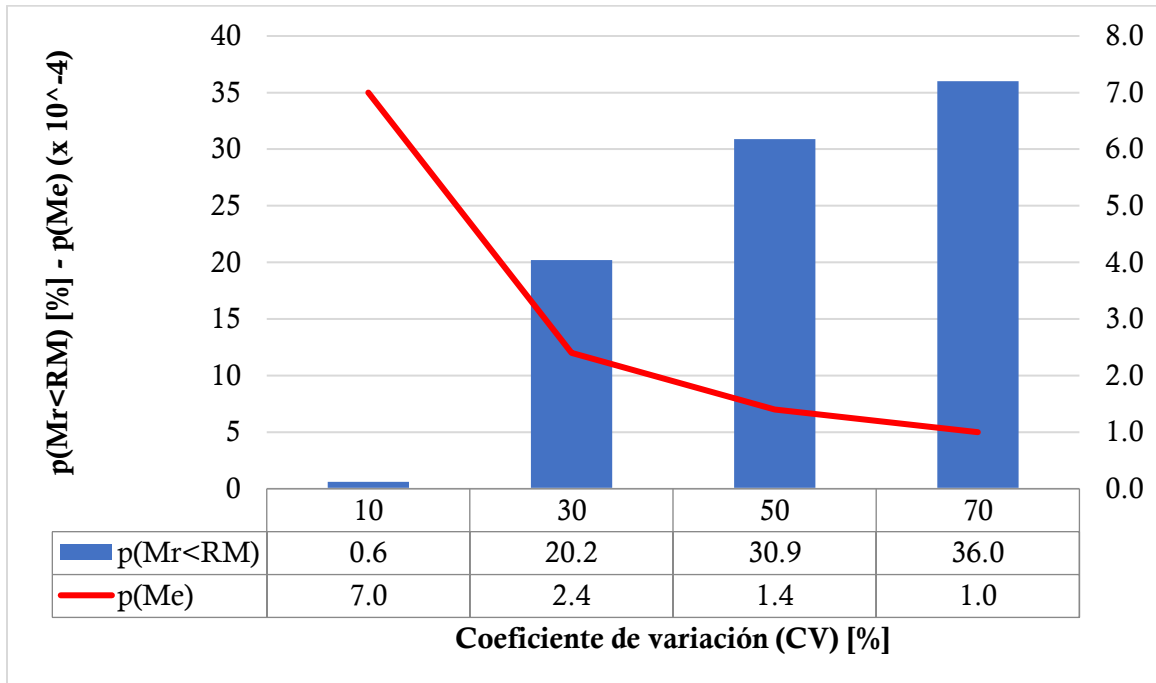


Figura 7-7. Relación entre el coeficiente de variación (CV) con la probabilidad que el módulo resiliente (Mr) sea menor al rango mínimo establecido en la metodología INVIAS 1998 (RM) y con la probabilidad de la mediana del módulo resiliente ($p(\text{Me})$) para las funciones de densidad normal de suelo tipo S1.

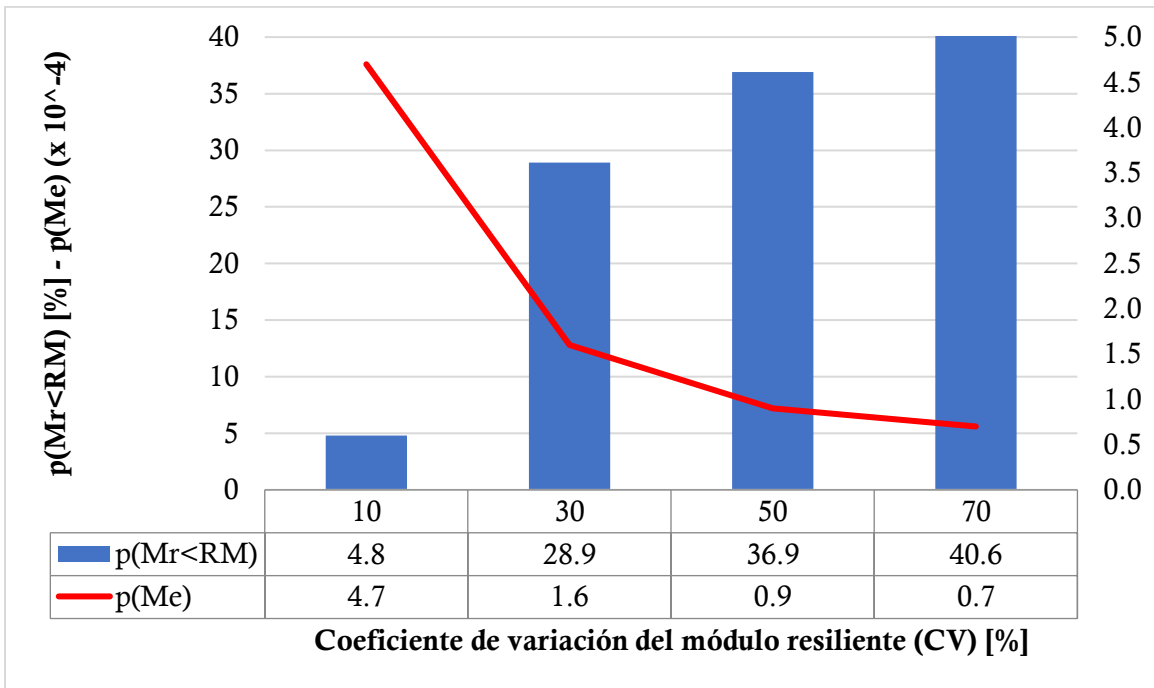


Figura 7-8. Relación entre el coeficiente de variación (CV) con la probabilidad que el módulo resiliente (M_r) sea menor al rango mínimo establecido en la metodología INVIAS 1998 (RM) y con la probabilidad de la mediana del módulo resiliente ($p(Me)$) para las funciones de densidad normal de suelo tipo S2.

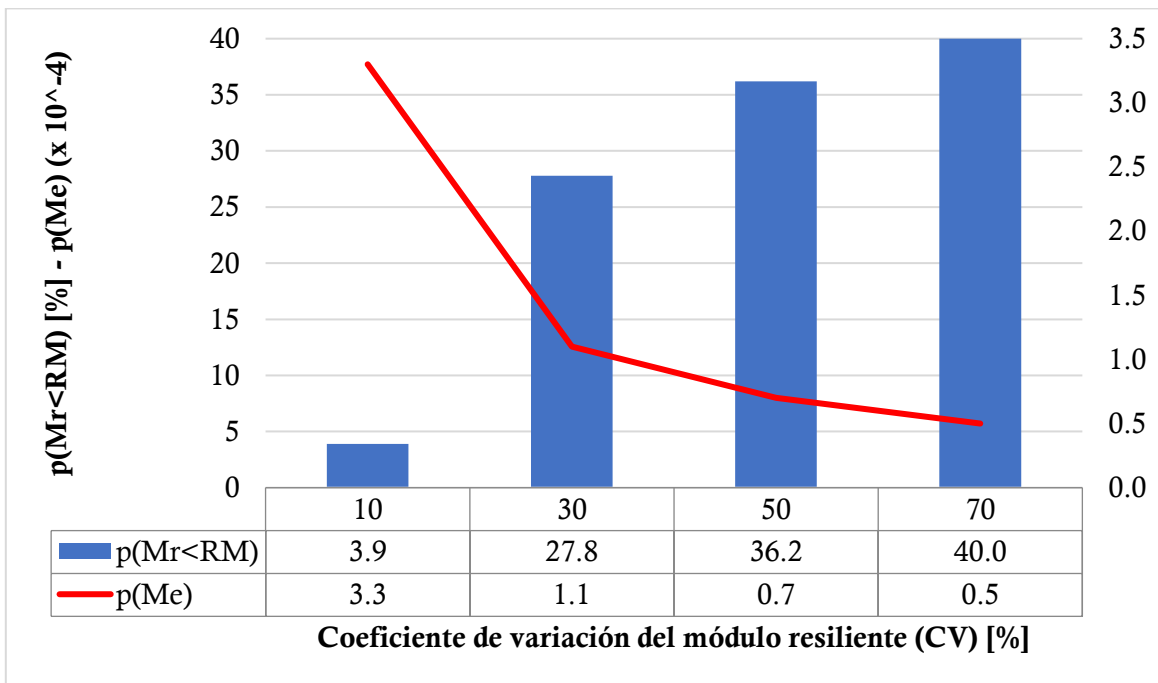


Figura 7-9. Relación entre el coeficiente de variación (CV) con la probabilidad que el módulo resiliente (M_r) sea menor al rango mínimo establecido en la metodología INVIAS 1998 (RM) y

con la probabilidad de la mediana del módulo resiliente ($p(Me)$) para las funciones de densidad normal de suelo tipo S3.

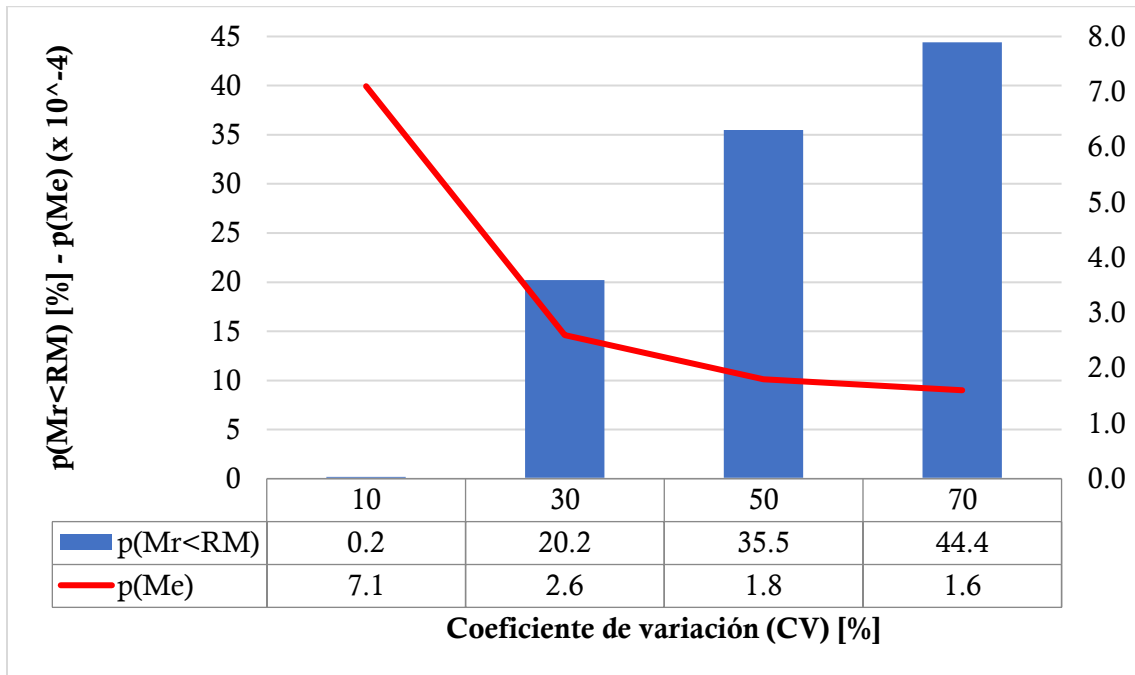


Figura 7-10. Relación entre el coeficiente de variación (CV) con la probabilidad que el módulo resiliente (Mr) sea menor al rango mínimo establecido en la metodología INVIAS 1998 (RM) y con la probabilidad de la mediana del módulo resiliente ($p(Me)$) para las funciones de densidad log-normal de suelo tipo S1.

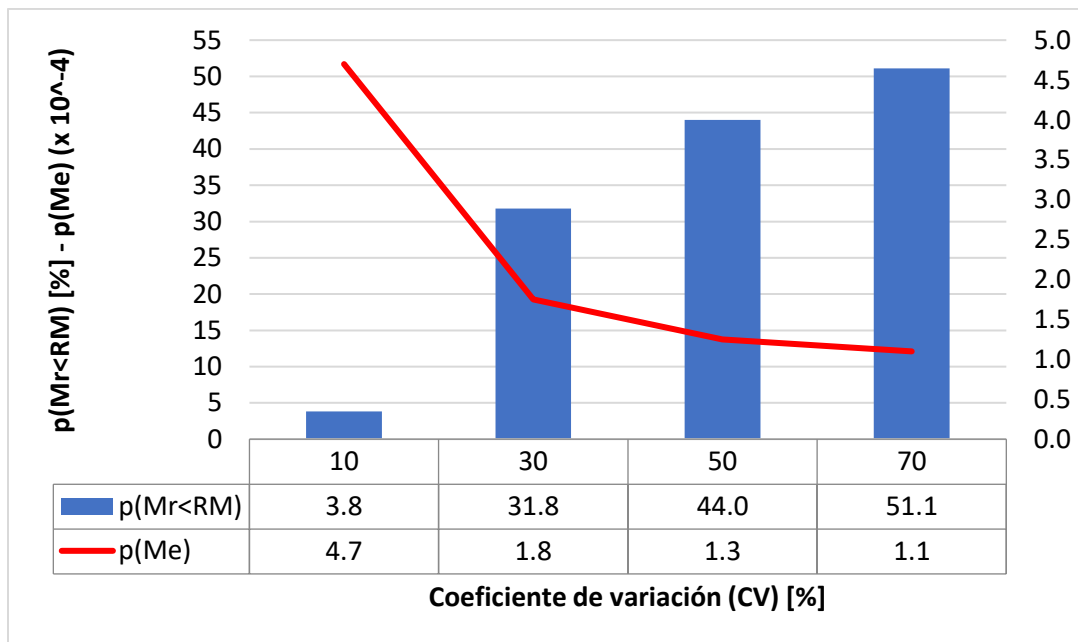


Figura 7-11. Relación entre el coeficiente de variación (CV) con la probabilidad que el módulo resiliente (Mr) sea menor al rango mínimo establecido en la metodología INVIAS 1998 (RM) y

con la probabilidad de la mediana del módulo resiliente ($p(Me)$) para las funciones de densidad log-normal de suelo tipo S2.

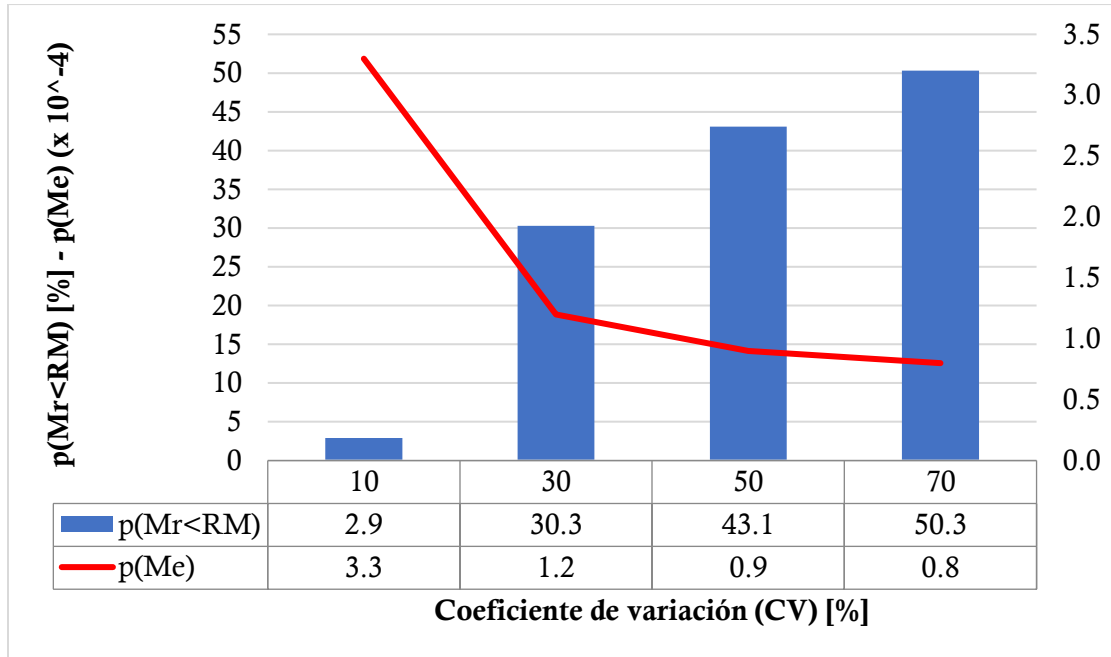


Figura 7-12. Relación entre el coeficiente de variación (CV) con la probabilidad que el módulo resiliente (Mr) sea menor al rango mínimo establecido en la metodología INVIAS 1998 (RM) y con la probabilidad de la mediana del módulo resiliente ($p(Me)$) para las funciones de densidad Log-normal de suelo tipo S3.

7.3 COMPARACIÓN DE FUNCIONES DE DENSIDAD

En la *Figura 7-13*, *Figura 7-14* y *Figura 7-15* se muestra la relación entre las funciones de densidad normal y log-normal de los módulos resilientes, para cada entorno de subrasante analizado

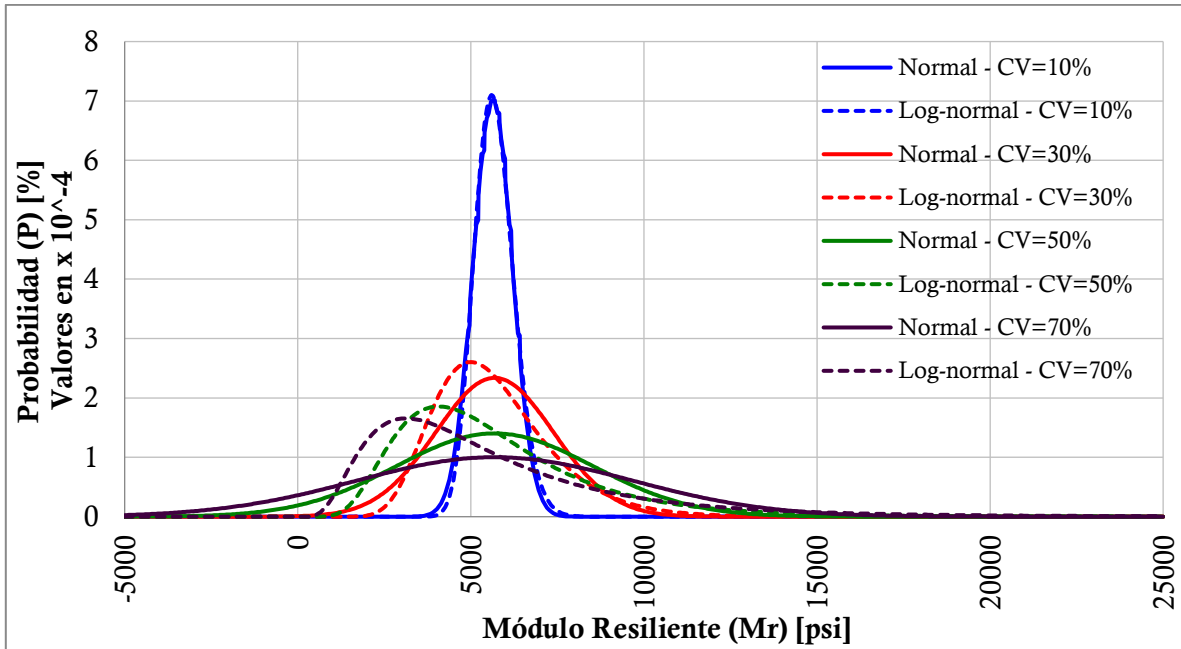


Figura 7-13. Funciones de densidad del módulo resiliente para el suelo tipo S1. (Convenciones de funciones: CV=10% - línea roja, CV=30% - línea azul, CV=50% - línea morada, CV=70% - línea negra).

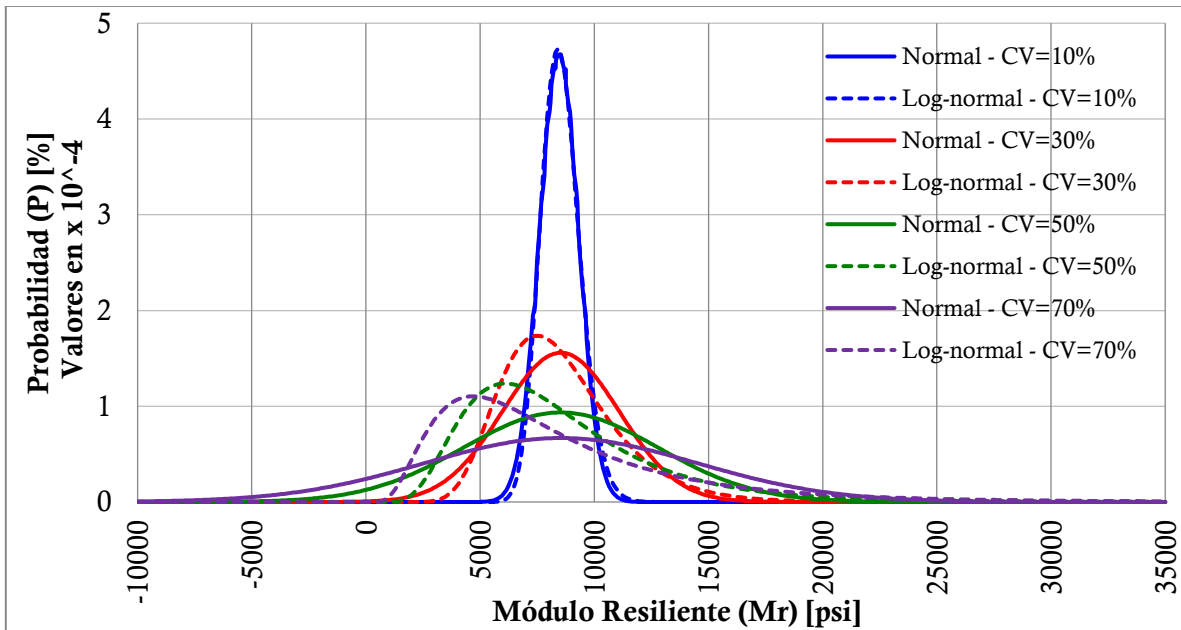


Figura 7-14. Funciones de densidad del módulo resiliente para el suelo tipo S2. (Convenciones de funciones: CV=10% - línea roja, CV=30% - línea azul, CV=50% - línea morada, CV=70% - línea negra).

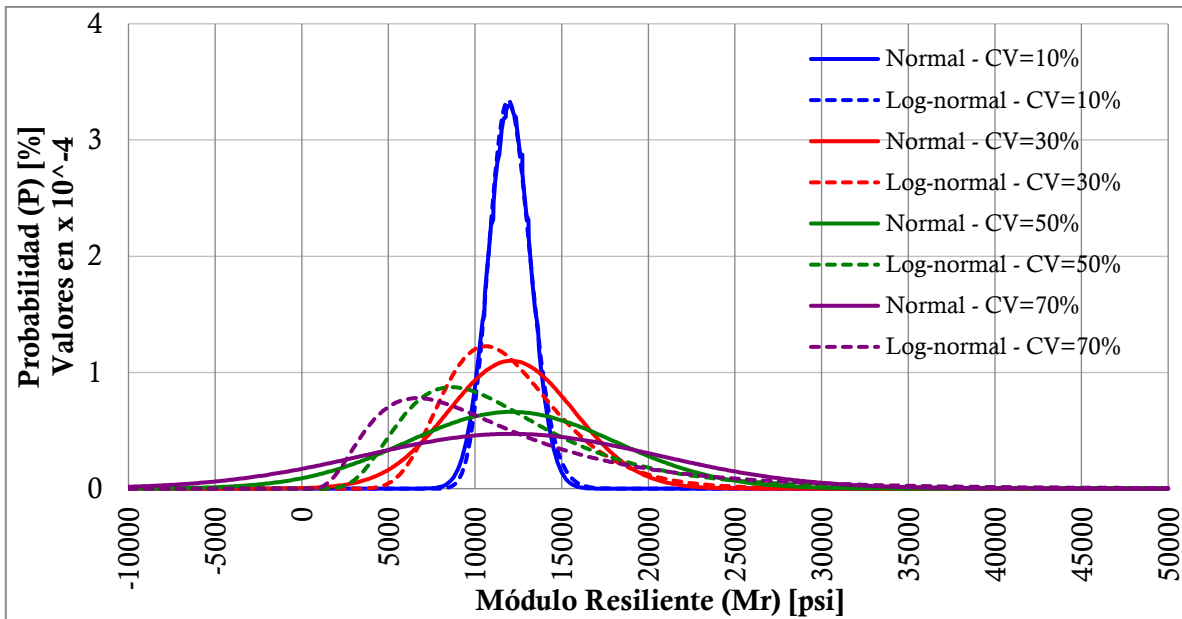


Figura 7-15. Funciones de densidad para el módulo resiliente del suelo tipo S3. (Convenciones de funciones: CV=10% - línea roja, CV=30% - línea azul, CV=50% - línea morada, CV=70% - línea negra).

8 ANEXO 2: FUNCIONES DE DENSIDAD DE FALLA

8.1 FUNCIÓN DE AJUSTE

En la *Tabla 8.1* y *Tabla 8.2* se presenta el análisis estadístico de los tipos de funciones que presentaron mejor ajuste, a las funciones de densidad de falla de cada estructura para las regiones R2 y R4, respectivamente.

Tabla 8.1. Ajuste estadístico de las funciones de densidad de falla de cada estructura para la región R2.

CLASIFICACIÓN DE LA ESTRUCTURA				FUNCIONES DE DISTRIBUCIÓN															
R	S	T	FDP Mr	Modelo CV=10%				Modelo CV=30%				Modelo CV=50%				Modelo CV=70%			
				Tipo de Función	χ^2	Asimetría	Curtosis	Tipo de Función	χ^2	Asimetría	Curtosis	Tipo de Función	χ^2	Asimetría	Curtosis	Tipo de Función	χ^2	Asimetría	Curtosis
R2	S1	T2	Normal	Gamma	0.62	0.46	3.32	Weibull	3.23	1.00	4.16	BetaGeneral	8.26	1.55	5.76	Weibull	22.90	2.44	11.90
R2	S1	T2	Log-Normal	Log-Normal	0.21	0.72	3.93	Log-Normal	0.27	2.75	18.93	Log-Normal	0.21	8.10	224.47	Log-Normal	0.21	29.38	7066.98
R2	S1	T4	Normal	Gamma	1.08	0.46	3.32	Weibull	2.36	0.97	4.05	BetaGeneral	8.08	1.56	5.81	Gamma	9.92	2.43	11.88
R2	S1	T4	Log-Normal	Log-Normal	0.27	0.72	3.93	Log-Normal	0.21	2.75	18.92	Log-Normal	0.33	8.11	225.16	Log-Normal	0.21	29.10	6880.53
R2	S1	T7	Normal	Gamma	0.91	0.46	3.32	Weibull	2.30	0.98	4.09	BetaGeneral	10.02	1.54	5.69	Kumaraswamy	6880.53	1.89	7.17
R2	S1	T7	Log-Normal	Log-Normal	0.21	0.72	3.93	Log-Normal	0.27	2.76	19.04	Log-Normal	0.27	8.10	224.81	Log-Normal	0.27	28.89	6744.90
R2	S1	T9	Normal	Gamma	0.85	0.46	3.32	Weibull	2.12	0.96	4.05	BetaGeneral	7.66	1.53	5.65	BetaGeneral	8.95	1.77	6.53
R2	S1	T9	Log-Normal	Pearson5	0.27	0.73	4.04	Log-Normal	0.21	2.75	18.98	Log-Normal	0.44	8.08	223.01	Log-Normal	0.27	28.81	6699.17
R2	S2	T2	Normal	Gamma	1.02	0.46	3.32	Weibull	2.41	0.97	4.07	BetaGeneral	8.26	1.60	6.06	Gamma	10.40	2.44	11.90
R2	S2	T2	Log-Normal	Log-Normal	0.21	0.72	3.93	Log-Normal	0.44	2.77	19.11	Log-Normal	0.33	8.14	227.07	Log-Normal	0.21	28.91	6759.04
R2	S2	T4	Normal	Gamma	0.73	0.46	3.32	Weibull	2.07	0.96	4.05	BetaGeneral	8.67	1.54	5.71	Gamma	9.74	2.44	11.91
R2	S2	T4	Log-Normal	Pearson6	0.21	0.70	3.82	Log-Normal	0.27	2.79	19.46	Log-Normal	0.33	8.09	223.97	Log-Normal	0.27	28.85	6724.21
R2	S2	T7	Normal	Gamma	0.73	0.46	3.32	Weibull	2.41	0.97	4.07	BetaGeneral	8.61	1.55	5.78	Gamma	9.55	2.44	11.92
R2	S2	T7	Log-Normal	Log-Normal	0.21	0.72	3.93	Log-Normal	0.27	2.76	18.99	Log-Normal	0.27	8.11	224.99	Log-Normal	0.33	29.07	6865.08
R2	S2	T9	Normal	Gamma	0.73	0.46	3.32	Weibull	2.82	0.99	4.14	BetaGeneral	7.90	1.53	5.62	Gamma	10.04	2.43	11.88
R2	S2	T9	Log-Normal	Log-Normal	0.21	0.72	3.93	Log-Normal	0.27	2.76	19.11	Log-Normal	0.33	8.09	224.01	Log-Normal	0.27	29.01	6821.32
R2	S3	T2	Normal	Gamma	0.91	0.46	3.32	Weibull	3.05	0.98	4.11	BetaGeneral	8.61	1.55	5.79	Gamma	9.80	2.44	11.96
R2	S3	T2	Log-Normal	Log-Normal	0.27	0.72	3.93	Log-Normal	0.21	2.75	18.97	Log-Normal	0.27	8.11	225.51	Log-Normal	0.27	28.79	6682.11
R2	S3	T4	Normal	Gamma	0.73	0.46	3.32	Weibull	2.30	0.97	4.06	BetaGeneral	10.02	1.57	5.83	Gamma	10.71	2.44	11.90
R2	S3	T4	Log-Normal	Invgauss	0.21	0.72	3.93	Log-Normal	0.27	2.75	18.90	Log-Normal	0.38	8.08	222.84	Log-Normal	0.44	29.47	7123.18
R2	S3	T7	Normal	Gamma	0.56	0.46	3.32	Weibull	2.18	0.97	4.06	BetaGeneral	9.60	1.51	5.54	Kumaraswamy	10.16	1.91	7.29

Título: Análisis por confiabilidad del modelo de diseño AASHTO-93 para pavimentos flexibles en el Valle de Aburra.

CLASIFICACIÓN DE LA ESTRUCTURA				FUNCIONES DE DISTRIBUCIÓN															
R	S	T	FDP Mr	Modelo CV=10%				Modelo CV=30%				Modelo CV=50%				Modelo CV=70%			
				Tipo de Función	χ^2	Asimetría	Curtosis	Tipo de Función	χ^2	Asimetría	Curtosis	Tipo de Función	χ^2	Asimetría	Curtosis	Tipo de Función	χ^2	Asimetría	Curtosis
R2	S3	T7	Log-Normal	Pearson6	0.27	0.70	3.82	Log-Normal	0.38	2.76	19.07	Log-Normal	0.21	8.07	222.41	Log-Normal	0.27	28.78	6678.13
R2	S3	T9	Normal	Gamma	0.73	0.46	3.32	Weibull	2.47	0.97	4.07	BetaGeneral	9.72	1.51	5.50	BetaGeneral	8.79	1.65	5.80
R2	S3	T9	Log-Normal	Log-Normal	0.21	0.72	3.93	Log-Normal	0.21	2.76	19.01	Log-Normal	0.27	8.10	224.60	Log-Normal	0.33	29.29	7003.28

R - Región, S - Entorno de subrasane, T - Categoría de tránsito, FDP Mr - Función de densidad de probabilidad del módulo resiliente.

Tabla 8.2 Ajuste estadístico de las funciones de densidad de falla de cada estructura para la región R2.

CLASIFICACIÓN DE LA ESTRUCTURA				FUNCIONES DE DISTRIBUCIÓN															
REG	ES	CT	FDP Mr	Modelo CV=10%				Modelo CV=30%				Modelo CV=50%				Modelo CV=70%			
				Tipo de Función	χ^2	Asimetría	Curtosis	Tipo de Función	χ^2	Asimetría	Curtosis	Tipo de Función	χ^2	Asimetría	Curtosis	Tipo de Función	χ^2	Asimetría	Curtosis
R4	S1	T2	Normal	Gamma	0.62	0.46	3.32	Weibull	3.23	1.00	4.16	BetaGeneral	8.26	1.55	5.76	Kwmaraswamy	10.40	1.95	7.56
R4	S1	T2	Log-Normal	Log-Normal	0.21	0.72	3.93	Log-Normal	0.27	2.75	18.93	Log-Normal	0.21	8.10	224.47	Log-Normal	0.21	29.38	7066.98
R4	S1	T4	Normal	Gamma	1.08	0.46	3.32	Weibull	2.36	0.97	4.05	BetaGeneral	8.08	1.56	5.81	Gamma	9.92	2.43	11.88
R4	S1	T4	Log-Normal	Log-Normal	0.27	0.72	3.93	Log-Normal	0.21	2.75	18.92	Log-Normal	0.33	8.11	225.16	Log-Normal	0.21	29.10	6880.53
R4	S1	T7	Normal	Gamma	0.91	0.46	3.32	Weibull	2.30	0.98	4.09	BetaGeneral	10.02	1.54	5.69	Kwmaraswamy	10.16	1.89	7.17
R4	S1	T7	Log-Normal	Pearson6	0.21	0.72	3.96	Log-Normal	0.27	2.76	19.04	Log-Normal	0.27	8.10	224.81	Log-Normal	0.27	28.89	6744.90
R4	S1	T9	Normal	Gamma	0.85	0.46	3.32	Weibull	2.12	0.96	4.05	BetaGeneral	7.66	1.53	5.65	BetaGeneral	6.95	2.44	11.92
R4	S1	T9	Log-Normal	Invgauss	0.33	0.70	3.82	Log-Normal	0.21	2.75	18.98	Log-Normal	0.44	8.08	223.01	Log-Normal	0.27	28.81	6699.17
R4	S2	T2	Normal	Gamma	1.02	0.46	3.32	Weibull	2.41	0.97	4.07	BetaGeneral	8.26	1.60	6.06	Gamma	10.40	2.44	11.90
R4	S2	T2	Log-Normal	Pearson6	0.21	0.72	3.93	Log-Normal	0.44	2.77	19.11	Log-Normal	0.33	8.14	227.07	Log-Normal	0.21	28.91	6759.04
R4	S2	T4	Normal	Gamma	0.73	0.46	3.32	Weibull	2.07	0.96	4.05	BetaGeneral	8.67	1.54	5.71	Gamma	9.74	2.44	11.91

Título: Análisis por confiabilidad del modelo de diseño AASHTO-93 para pavimentos flexibles en el Valle de Aburra.

CLASIFICACIÓN DE LA ESTRUCTURA				FUNCIONES DE DISTRIBUCIÓN															
REG	ES	CT	FDP Mr	Modelo CV=10%				Modelo CV=30%				Modelo CV=50%				Modelo CV=70%			
				Tipo de Función	χ^2	Asimetría	Curtosis	Tipo de Función	χ^2	Asimetría	Curtosis	Tipo de Función	χ^2	Asimetría	Curtosis	Tipo de Función	χ^2	Asimetría	Curtosis
R4	S2	T4	Log-Normal	Pearson6	0.21	0.70	3.82	Log-Normal	0.27	2.79	19.46	Log-Normal	0.33	8.09	223.97	Log-Normal	0.27	28.85	6724.21
R4	S2	T7	Normal	Gamma	0.73	0.46	3.32	Weibull	2.41	0.97	4.07	BetaGeneral	8.61	1.55	5.78	Gamma	9.55	2.44	11.92
R4	S2	T7	Log-Normal	Log-Normal	0.21	0.72	3.93	Log-Normal	0.27	2.76	18.99	Log-Normal	0.27	8.11	224.99	Log-Normal	0.33	29.07	6865.08
R4	S2	T9	Normal	Gamma	0.73	0.46	3.32	Weibull	2.82	0.99	4.14	BetaGeneral	7.90	1.53	5.62	Gamma	10.04	2.43	11.88
R4	S2	T9	Log-Normal	Log-Normal	0.21	0.72	3.93	Log-Normal	0.27	2.76	19.11	Log-Normal	0.33	8.09	224.01	Log-Normal	0.27	29.01	6821.32
R4	S3	T2	Normal	Gamma	0.91	0.46	3.32	Weibull	3.05	0.98	4.11	BetaGeneral	8.61	1.55	5.79	Gamma	9.80	2.44	11.96
R4	S3	T2	Log-Normal	Log-Normal	0.27	0.72	3.93	Log-Normal	0.21	2.75	18.97	Log-Normal	0.27	8.11	225.51	Log-Normal	0.27	28.79	6682.11
R4	S3	T4	Normal	Gamma	0.73	0.46	3.32	Weibull	2.30	0.97	4.06	BetaGeneral	10.02	1.57	5.83	Gamma	10.71	2.44	11.90
R4	S3	T4	Log-Normal	Invgauss	0.21	0.70	3.82	Log-Normal	0.27	2.75	18.90	Log-Normal	0.38	8.08	222.84	Log-Normal	0.44	29.47	7123.18
R4	S3	T7	Normal	Gamma	0.56	0.46	3.32	Weibull	2.18	0.97	4.06	BetaGeneral	9.60	1.51	5.54	Kwmaraswamy	10.16	2.44	11.89
R4	S3	T7	Log-Normal	Pearson6	0.27	0.73	4.00	Log-Normal	0.38	2.76	19.07	Log-Normal	0.21	8.07	222.41	Log-Normal	0.27	28.78	6678.13
R4	S3	T9	Normal	Gamma	0.73	0.46	3.32	Weibull	2.47	0.97	4.07	BetaGeneral	9.72	1.51	5.50	BetaGeneral	8.79	2.46	12.11
R4	S3	T9	Log-Normal	Log-Normal	0.21	0.72	3.93	Log-Normal	0.21	2.76	19.01	Log-Normal	0.27	8.10	224.60	Log-Normal	0.33	29.29	7003.28

R - Región, S - Entorno de subrasane, T - Categoría de tránsito, FDP Mr - Función de densidad de probabilidad del módulo resiliente.

8.2 CONFIABILIDAD DEL MÉTODO INVIAS 1998

En la *Figura 8-1*, *Figura 8-2*, *Figura 8-3* y *Figura 8-4* se reporta la carga de diseño asociada a una confiabilidad del 90% para la región R2 y R4, considerando ambas funciones de densidad del módulo resiliente (normal y log-normal).

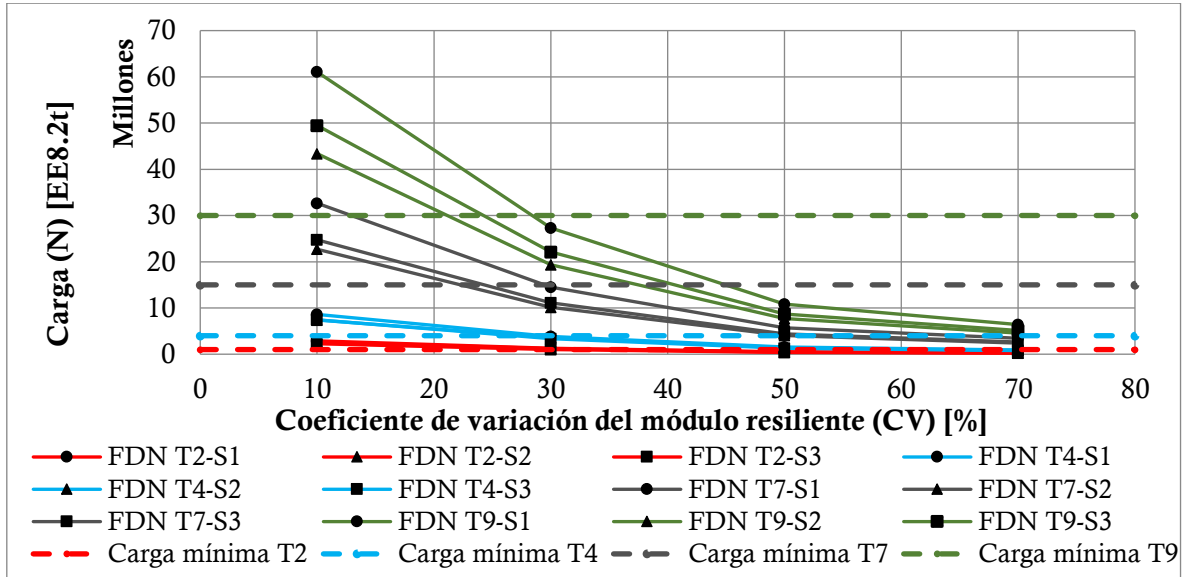


Figura 8-1. Carga de diseño asociada a una confiabilidad del 90%, en las estructuras de pavimento de la metodología INVIAS 1998, considerando las funciones de densidad del módulo resiliente normal, para la región R2.

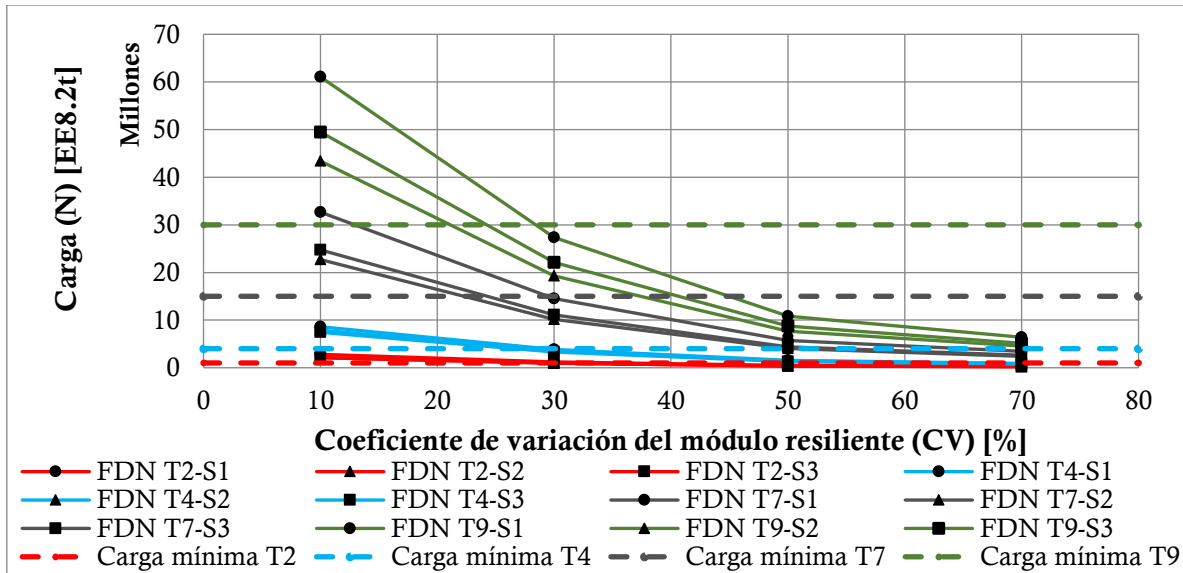


Figura 8-2. Carga de diseño asociada a una confiabilidad del 90%, en las estructuras de pavimento de la metodología INVIAS 1998, considerando las funciones de densidad del módulo resiliente normal, para la región R4.

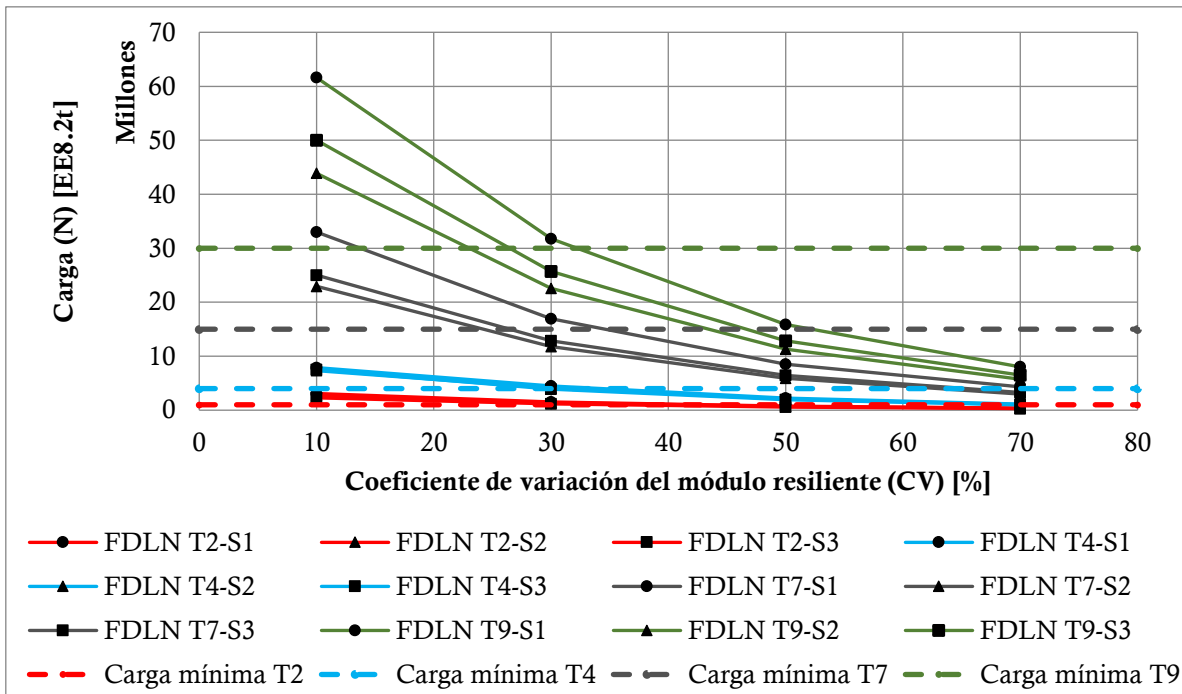


Figura 8-3. Carga de diseño asociada a una confiabilidad del 90%, en las estructuras de pavimento de la metodología INVIAS 1998, considerando las funciones de densidad del módulo resiliente log-normal, para la región R2.

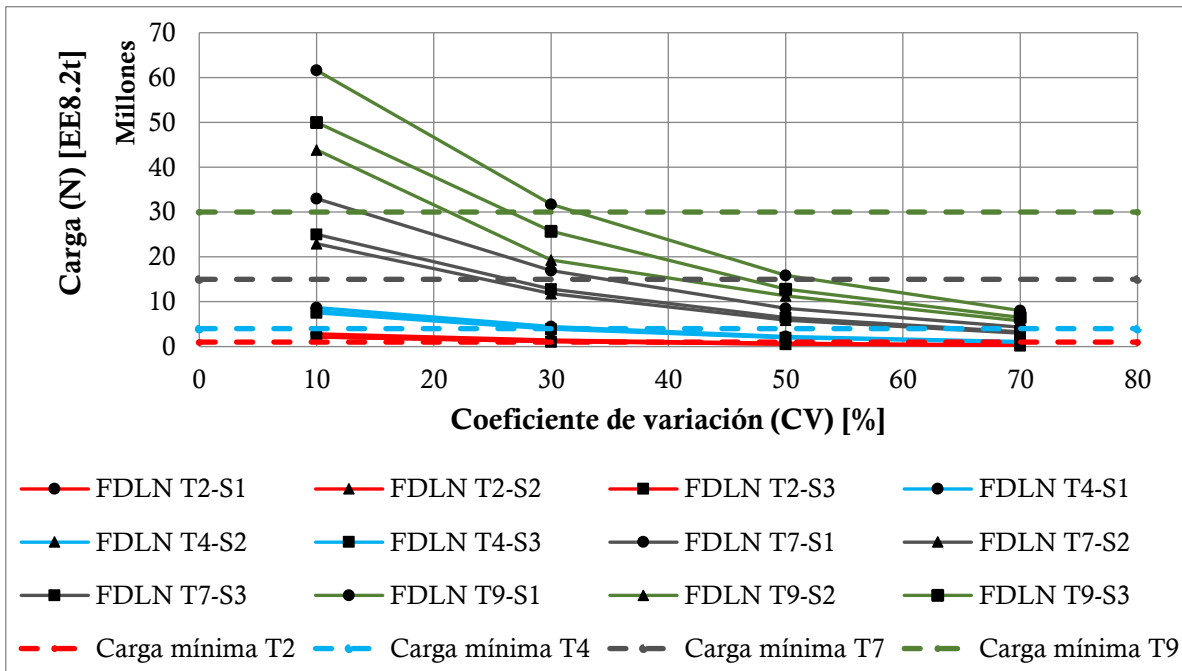


Figura 8-4. Carga de diseño asociada a una confiabilidad del 90%, en las estructuras de pavimento de la metodología INVIAS 1998, considerando las funciones de densidad del módulo resiliente log-normal, para la región R4.

La *Figura 8-5* y *Figura 8-6* reportan el análisis estadístico efectuado en la *Figura 8-1* y *Figura 8-3* y la *Figura 8-2* y *Figura 8-4*, respectivamente, considerando los valores máximos de coeficientes de variación del módulo resiliente que garantiza una confiabilidad del 90%, para cada categoría de tránsito y entorno de subrasante, considerando las funciones normales y log-normales de ambas regiones.

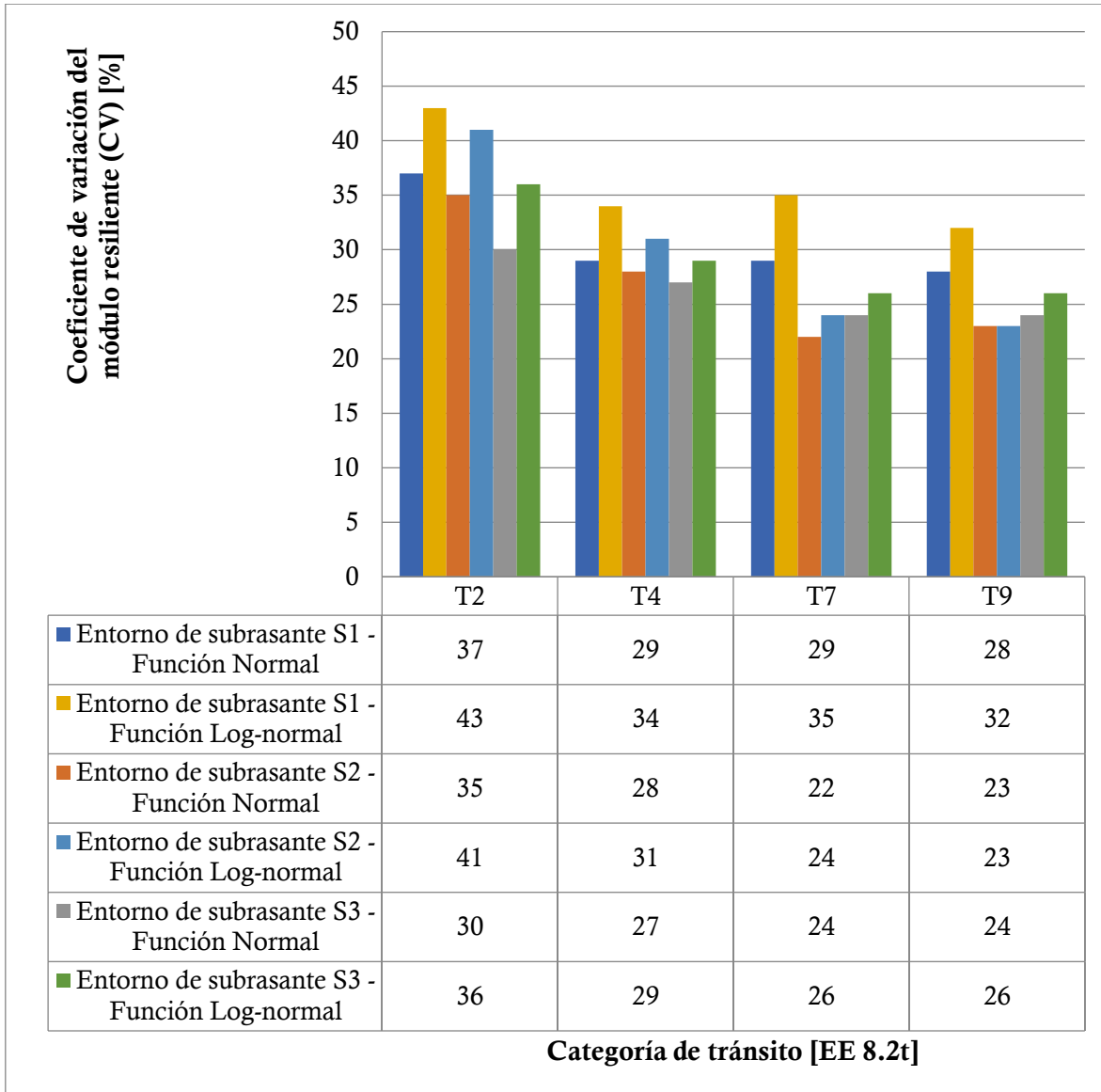


Figura 8-5. Comparación de los valores máximos del coeficiente de variación, del módulo resiliente, que garantiza una confiabilidad del 90%, en el comportamiento mecánico de la estructura, para cada categoría de tránsito y entorno de subrasante, considerando las funciones de densidad Normales y Log-normales del módulo resiliente, en la región R2.

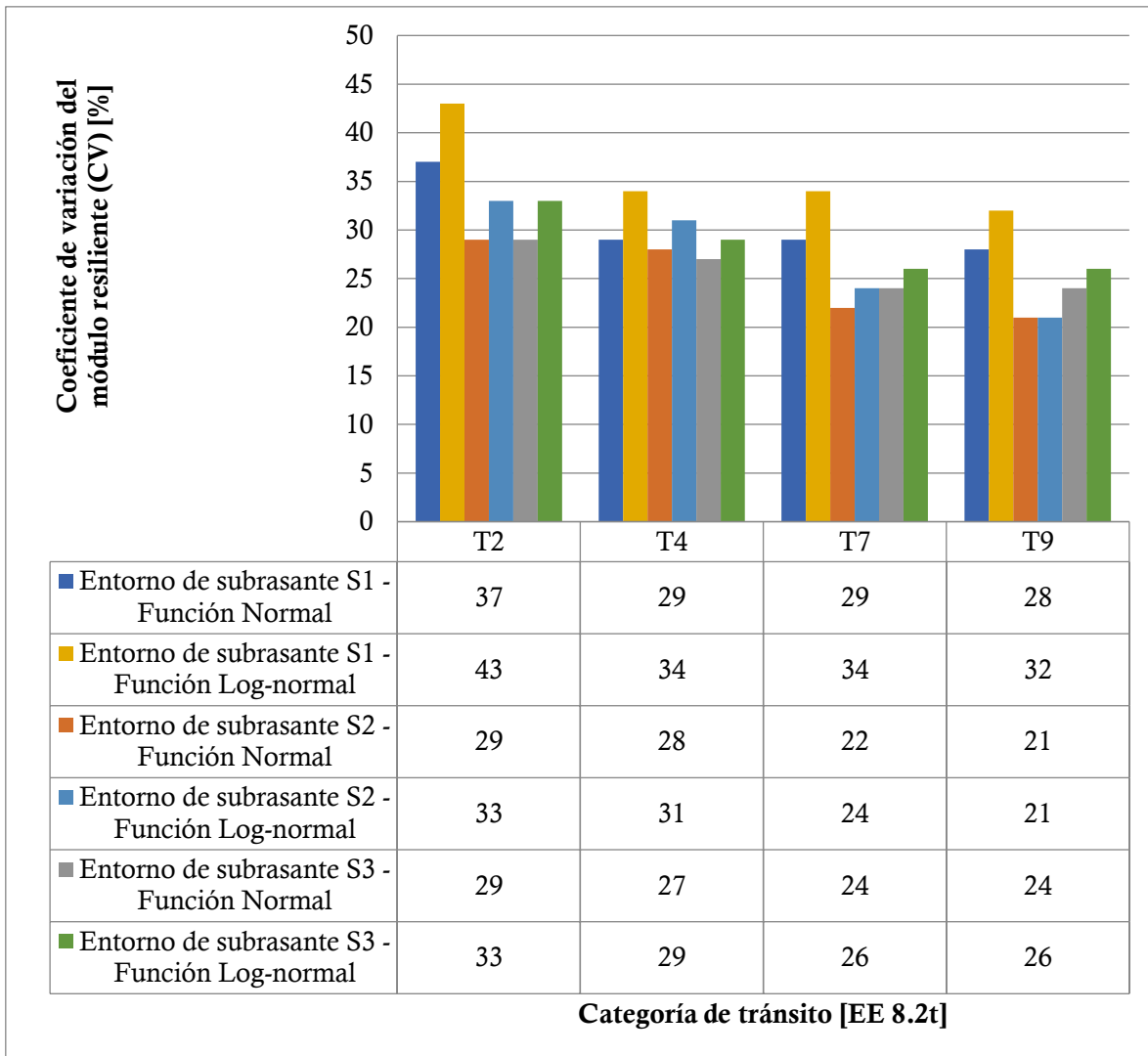


Figura 8-6. Comparación de los valores máximos del coeficiente de variación que garantiza una confiabilidad del 90%, en el comportamiento mecánico de la estructura, para cada categoría de tránsito y entorno de subrasante, considerando las funciones de densidad Normales y Log-normales del módulo resiliente, en la región R4.

8.3 ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD

En la figura Figura 8-7, Figura 8-8, Figura 8-9Se presenta la confiabilidad de cada estructura de pavimento, asociada al valor mínimo de cada categoría de tránsito establecida por la *metodología INVIAS 1998*, considerando ambas regiones de diseño.

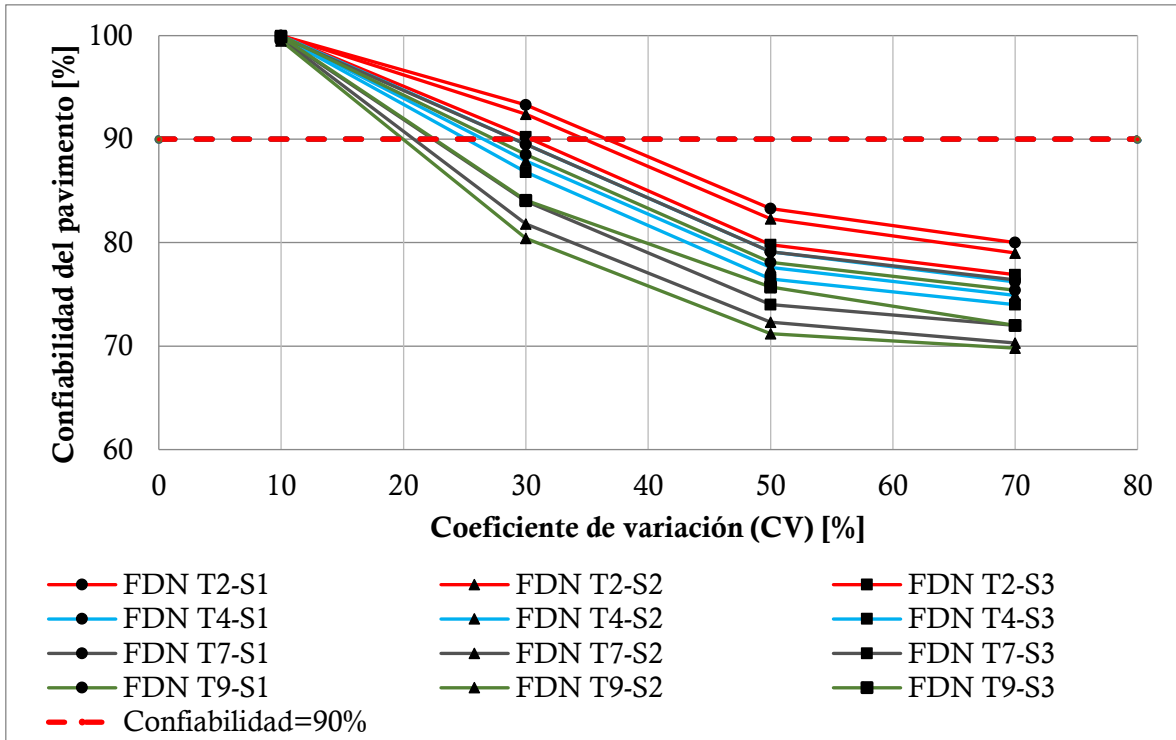


Figura 8-7. Confiabilidad de las estructuras de pavimento, considerando las funciones de densidad del módulo resiliente normal, para la región R2.

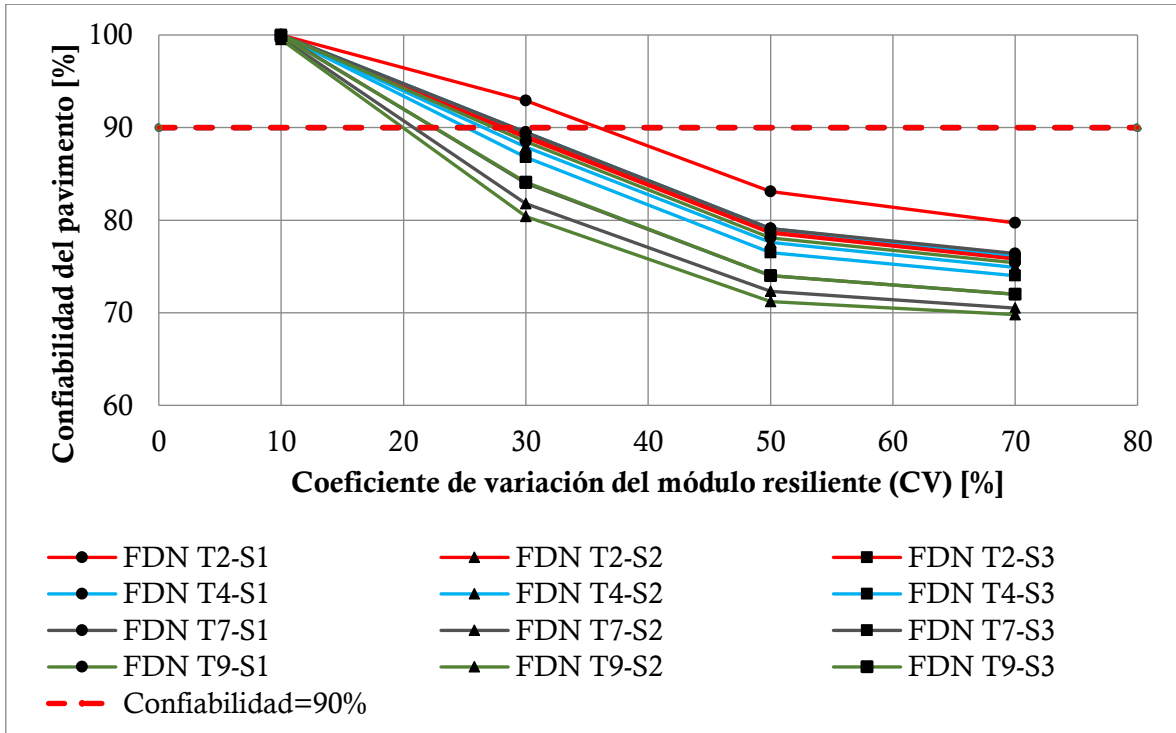


Figura 8-8. Confiabilidad de las estructuras de pavimento, considerando las funciones de densidad del módulo resiliente normal, para la región R4.

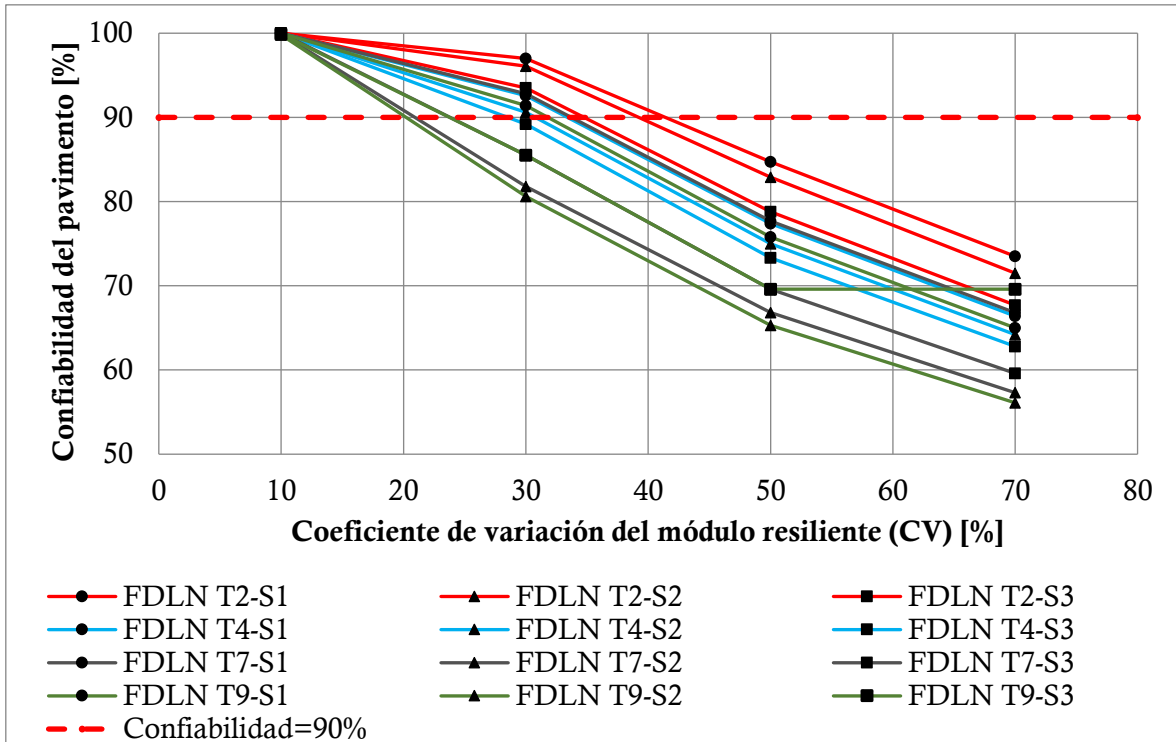


Figura 8-9. Confiabilidad de las estructuras de pavimento, considerando las funciones de densidad del módulo resiliente log-normal, para la región R2.

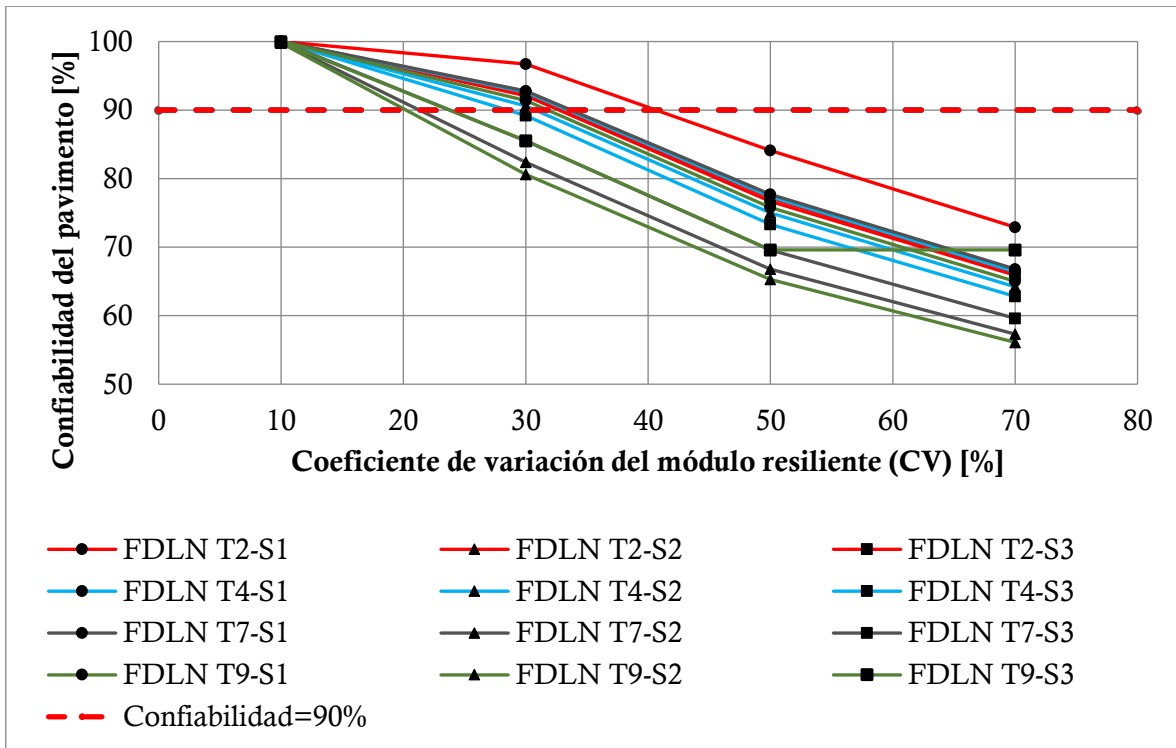


Figura 8-10. Confiabilidad de las estructuras de pavimento, considerando las funciones de densidad del módulo resiliente log-normal, para la región R4.

La *Figura 8-11* y *Figura 8-12* representan las envolventes de confiabilidad de las estructuras de pavimento, asociada a cada función de probabilidad, reportadas en la *Figura 8-7*, *Figura 8-8*, *Figura 8-9* y *Figura 8-10*.

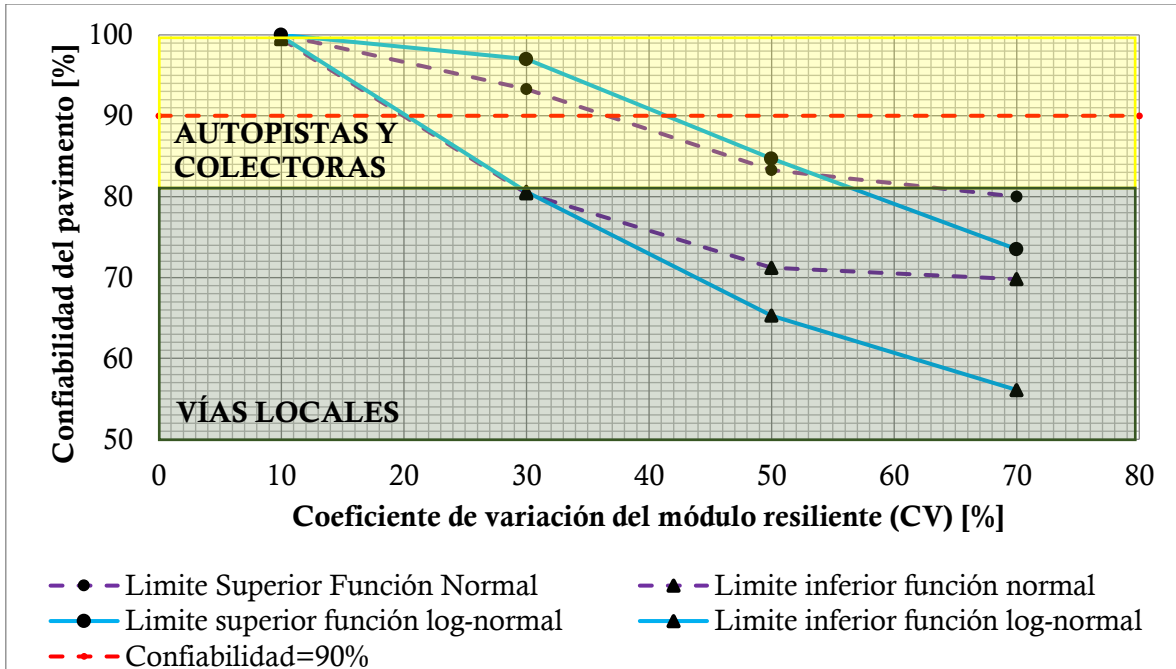


Figura 8-11. Comparación de las envolventes de confiabilidad de las estructuras de pavimento, asociada a las funciones de densidad del módulo resiliente normal y log-normal, para la región R2.

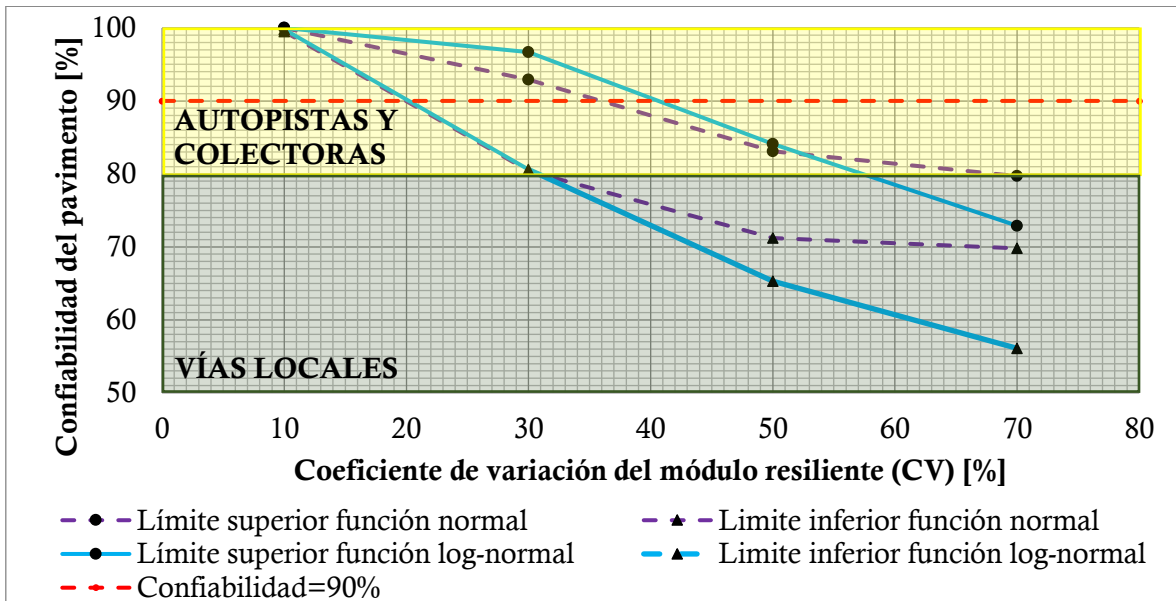


Figura 8-12. Comparación de las envolventes de confiabilidad de las estructuras de pavimento, asociada a las funciones de densidad del módulo resiliente normal y log-normal, para la región R4.

Con el fin de comprobar los resultados obtenidos en el capítulo 8.2, se presentan los coeficientes de variación del módulo resiliente asociados a una confiabilidad del 90%, recomendada por la metodología INVIAS 1998, en la **Figura 8-13** y **Figura 8-14**.

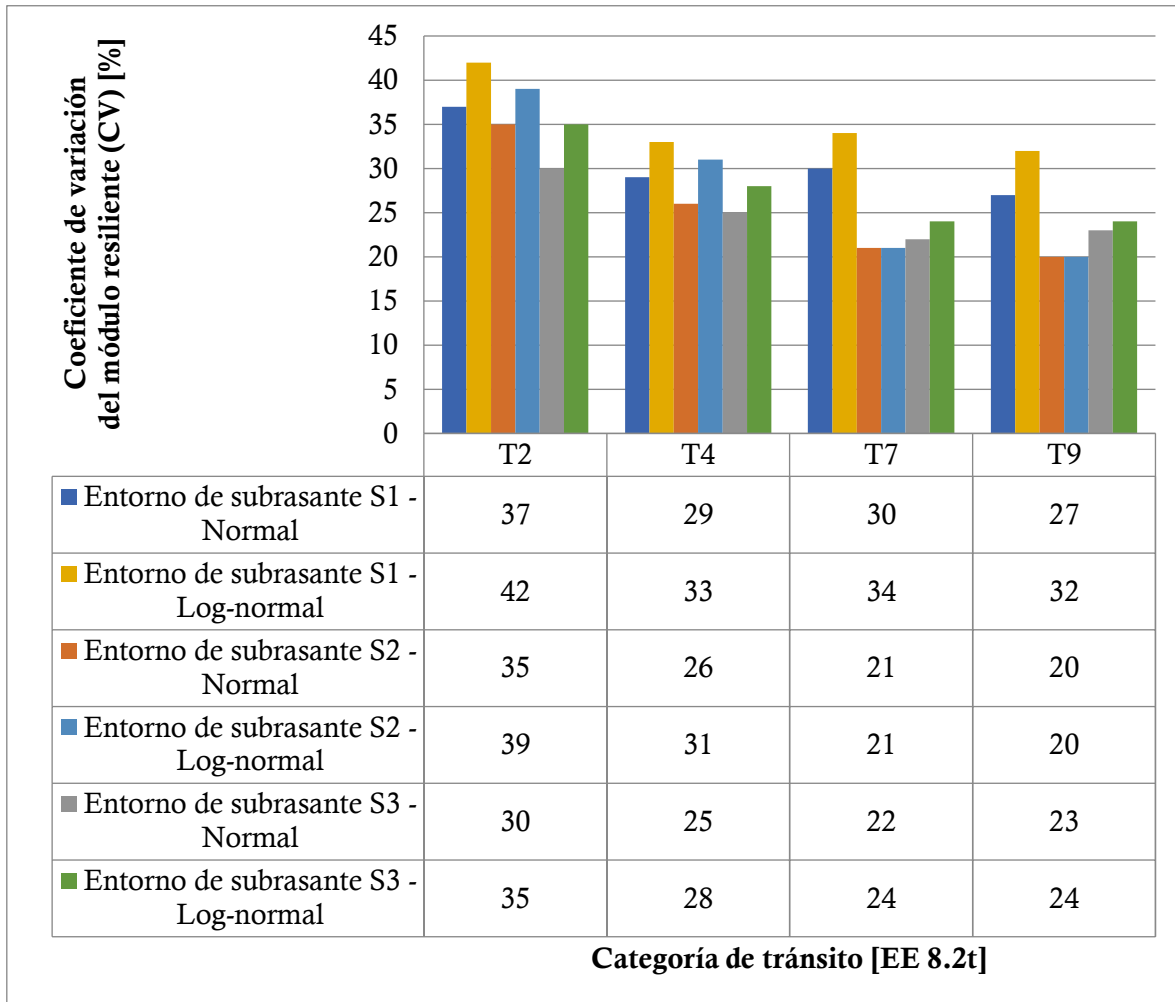


Figura 8-13. Comparación de los valores máximos del coeficiente de variación que garantiza una confiabilidad del 90%, en el comportamiento mecánico de la estructura, para cada categoría de tránsito y entorno de subrasante, considerando las funciones de densidad normales y log-normales del módulo resiliente, en la región R2.

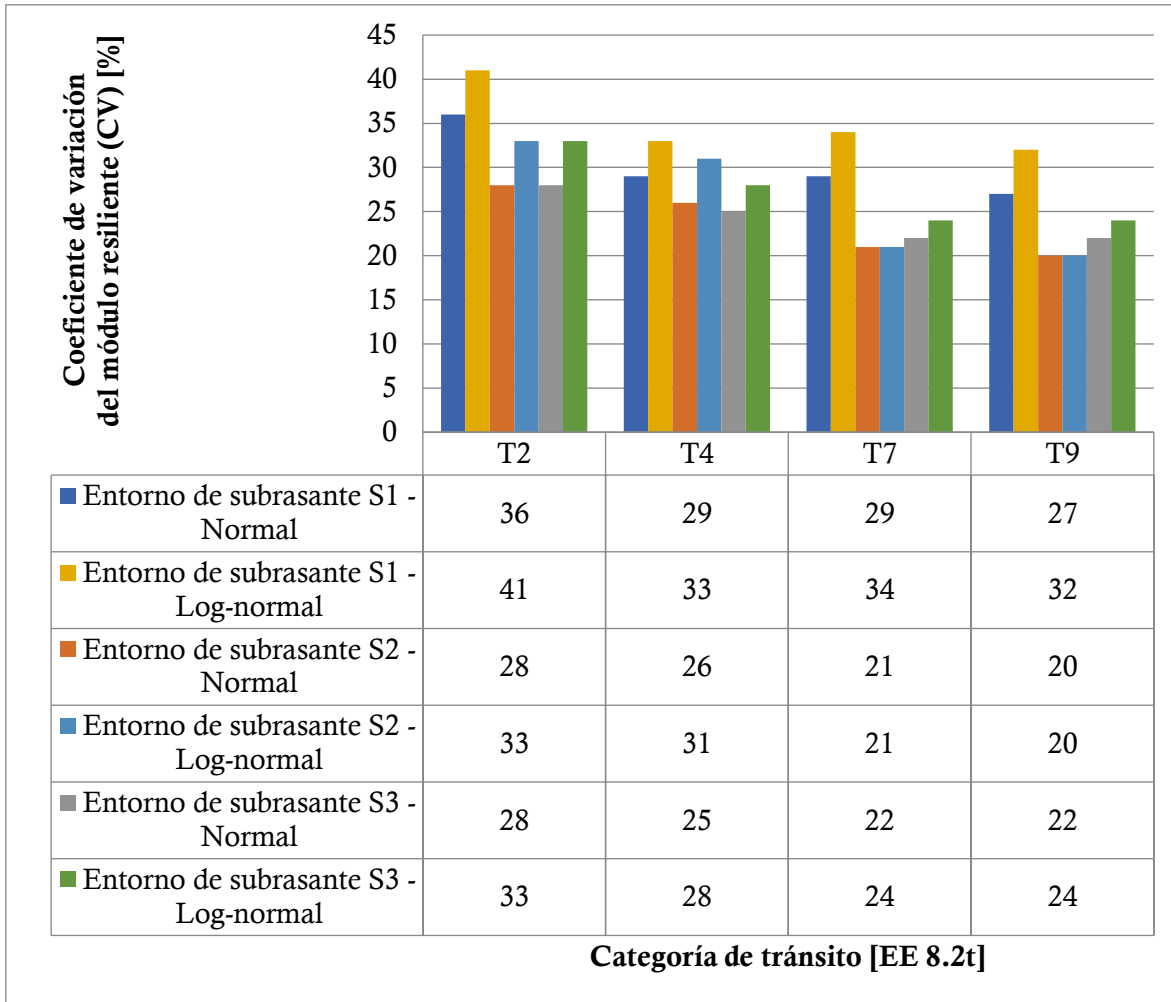


Figura 8-14. Comparación de los valores máximos del coeficiente de variación que garantiza una confiabilidad del 90%, en el comportamiento mecánico de la estructura, para cada categoría de tránsito y entorno de subrasante, considerando las funciones de densidad normales y log-normales del módulo resiliente, en la región R4.