

**DESARROLLO DE MODELOS DE SERVICIABILIDAD PARA LA EVALUACIÓN
DE LA INFRAESTRUCTURA NO CONCESIONADA DE LA RED VIAL
NACIONAL DE CARRETERAS PRIMARIA**



DELIA MARÍA CURIEL CASTELLAR

**UNIVERSIDAD DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
BARRANQUILLA
OCTUBRE DE 2015**

**DESARROLLO DE MODELOS DE SERVICIABILIDAD PARA LA EVALUACIÓN
DE LA INFRAESTRUCTURA NO CONCESIONADA DE LA RED VIAL
NACIONAL DE CARRETERAS PRIMARIA**

DELIA MARÍA CURIEL CASTELLAR

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR EL TÍTULO DE MAGISTER EN
INGENIERÍA CIVIL**

LUIS GUILLERMO FUENTES PUMAREJO, PhD.
Docente Investigador

Grupo de Investigación

TRANVÍA

Código – LAC 0045552

Facultad de Ingeniería

Universidad del Norte

Línea de Investigación

INFRAESTRUCTURA VIAL

**UNIVERSIDAD DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
BARRANQUILLA
OCTUBRE DE 2015**



AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mis más profundos agradecimientos:

- A mis padres y hermanas, por brindarme siempre su apoyo incondicional.
- A las personas que me colaboraron y apoyaron en el desarrollo de esta investigación, a Luis Guillermo Fuentes Pumarejo, a Julián Arellana y a Víctor Manuel Cantillo, excelentes profesores y asesores. A mis compañeros Luis Ángel Cantillo, Daniel Abudinen y Claudia Velosa, quienes también hicieron parte del proyecto CONVENIO DE COLABORACION PARA AUNAR ESFUERZOS ENTRE EL INVIAS Y LA UNIVERSIDAD DEL NORTE PARA EL DESARROLLO DE UN SISTEMA DE GESTION INTEGRAL PARA LA INFRAESTRUCTURA VIAL COLOMBIANA de donde se desprendió esta investigación.
- A la Universidad del Norte, al Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental y el grupo de investigación TRANVÍA por el apoyo brindado, sin el cual no hubiese sido posible realizar mis estudios de Maestría.

RESUMEN

La Serviciabilidad de una vía representa la percepción de la calidad de la superficie de rodadura que experimenta el usuario. Los modelos de Serviciabilidad son modelos matemáticos que permiten calcular el índice de Serviciabilidad a través de la correlación de parámetros físicos cuantificables asociados con el estado de una vía con la percepción de comodidad y confort que experimentan los usuarios de la misma al transitarla.

El Instituto Nacional de Vías –INVÍAS- utiliza dos metodologías para evaluar el estado de las vías bajo su administración, una de ellas es el Criterio Técnico el cual corresponde a una calificación obtenida como resultado de la ponderación de parámetros relacionados con daños presentes en la vía; la otra es el Criterio Visual que consiste en la caracterización subjetiva de una vía dada por un Administrador Vial que refleja el estado de *transitabilidad* y/o confort de la misma. Para una misma vía se evalúan estos dos parámetros y lo que se espera es que al compararlos ambos apunten a una misma categoría o calificación.

Esta investigación se basa en la formulación modelos matemáticos a través de la correlación del Criterio Visual y el Criterio Técnico, definidos por las principales tipos de daños de una vía que pueden tener un impacto sobre la transitabilidad y comodidad de los usuarios.

Para lograr el objetivo buscado fue necesario inicialmente revisar, depurar y organizar la información suministrada por el Instituto Nacional de Vías –INVÍAS-, luego comparar por medio de diagramas de dispersión y diagramas de caja si visualmente el Criterio Visual y el Criterio Técnico se encontraban estadísticamente relacionados, después aplicar un análisis de Varianzas que permitió constatar que si existe efecto alguno de la variable Criterio Visual sobre la variable Criterio Técnico, conociendo esto se procedió a aplicar modelos de regresión lineal múltiple, modelos logit ordinal y modelos probit ordinal para determinar los coeficientes de las variables que definirían los modelos para cada territorial.

Para los tres tipos de modelos se utilizó el método “Stepwise” conocido como eliminación hacia atrás o “Backward Elimination”. Al aplicar este método se iban eliminando en cada paso aquella variable cuyo “P-value” fuera el mayor de todos hasta conseguir que solo quedaran aquellas que fueran significativas, es decir, con “P-value” menor a 0.05.

Para los modelos de regresión lineal la variable baches resulto significativa para casi todos los modelos, a excepción de los de las territoriales Choco y Sucre, mientras que la variable otros daños es la que resulto significativa para un menor número de territoriales.



En los modelos logit y probit las variables baches, fisuras y deformaciones fueron significativas para casi todos los modelos que se pudieron estimar y al igual que en los modelos de regresión, otros daños fue la que menos se repitió. Entre estos tres tipos de modelos los logit lograron un mayor grado de predicción, a excepción de la territorial Boyacá, Sucre, Tolima y Valle donde los modelos de regresión lineal tienen una predicción mayor.

Palabras Claves: Serviabilidad, Criterio Visual, Criterio Técnico, regresión lineal, logit ordinal, probit ordinal.



ABSTRACT

The Serviceability of a pathway represents the perceived quality of the road surface that the user experiences. Serviceability models are mathematical models that calculate the index Serviceability through the correlation of measurable physical parameters associated with the state of a road with the perception of comfort experienced by users of it to transit it.

The National Roads Institute -INVÍAS- uses two methodologies for assessing the state of the roads under management, one of which is the technical criteria which corresponds to a score obtained as a result of the weighting of parameters related to damage present on the road; the other is the Visual Criteria consisting characterization opinion of a path given by a manager Vial reflecting the state of trafficability and / or comfort of the same. For the same road these two parameters are evaluated and is expected that when comparing both point to the same category or rating.

This research is based on mathematical models formulation through the correlation of visual criteria and the technical criteria, defined by the main types of damage in a way that may have an impact on walkability and convenience of users.

To achieve the desired goal initially was necessary to review, refine and organize information provided by the National Roads Institute -INVÍAS-, then compare using scatter plots and box plots to visually whether the Visual Criteria and Technical Criteria were statistically related, then apply a variance analysis which revealed that if there is any effect of the variable on Visual Criteria Technical Criteria variable, knowing this is proceeded to apply multiple linear regression models, ordinal logit models and ordinal probit models to determine the coefficients of the variables that define each model.

For the three types of models the "Stepwise" method known as "Backward Elimination" was used. By applying this method they were eliminating each variable that step which "P-value" was the greatest of all to ensure that only those that were significant remain, ie, with "P-value" less than 0.05.

For linear regression models the bumpy variable was significant for almost all models, except for the territorial Choco and Sucre, while other damage is the variable which was significant for fewer territorial.

In the logit and probit variables potholes, cracks and deformation were significant for almost all models that could estimate and as in the regression models, other damage was less repeated. The logit models achieved a greater degree of predictability, with the exception of Boyacá, Sucre, Tolima and Valle territorial where linear regression models have a higher prediction.



Keywords: Serviceability, Criterion Visual, Technical Criteria, linear regression, ordinal logit, probit ordinal.

TABLA DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS.....	III
RESUMEN.....	IV
ABSTRACT.....	VI
1 INTRODUCCIÓN.....	15
1.1 OBJETIVOS.....	16
1.2 HIPOTESIS.....	16
1.3 CONTRIBUCIONES	16
1.4 ESTRUCTURA Y CONTENIDO	17
2. MARCO CONCEPTUAL.....	18
2.1 SERVICIABILIDADDE UNA VÍA.....	18
2.1.1 Índice De Serviabilidad Presente o PSI.....	18
2.1.1 Antecedentes en el desarrollo de modelos de serviabilidad	20
2.3 EVALUACIÓN DEL ESTADO DE LA RED VIAL A CARGO DEL INVÍAS	22
2.3.1 Criterio Visual.....	22
2.3.2 Criterio Técnico	23
3 ESPECIFICACIÓN DE LOS MODELOS.....	30
3.1 DATOS	30
3.2 ANÁLISIS DESCRIPTIVO: DIAGRAMAS DE DISPERSIÓN.....	31
3.3 ANÁLISIS DESCRIPTIVO: DIAGRAMAS DE CAJAS.....	40
3.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	50
3.5 DESARROLLO DE MODELOS DE REGRESIÓN LINEAL.....	53
3.6 DESARROLLO DE MODELOS LOGIT ORDINAL Y PROBIT ORDINAL	54
4 RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	57
4.1 MODELOS DE REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE.....	57
4.2 MODELOS LOGIT ORDINAL	62
4.3 MODELOS PROBIT ORDINAL.....	70
4.4 COMPARACIÓN DE MODELOS	78
5 CONCLUSIONES.....	80
6 ANEXOS.....	84
6.1 PASO A PASO MODELOS DE REGRESIÓN LINEAL.....	84



6.2	CÓDIGO UTILIZADO PARA ESTIMAR LOS MODELOS LOGIT Y PROBIT CON EL SOFTWARE R PROJECT	92
6.3	PASO A PASO MODELOS LOGIT ORDINAL	93
6.4	PASO A PASO MODELOS PROBIT ORDINAL	97
7	BIBLIOGRAFÍA.....	100



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Calificación de una vía de acuerdo a su Índice de Serviabilidad.....	19
Tabla 2. Porcentajes o pesos establecidos para las calificaciones de los parámetros evaluados en el Criterio Técnico.....	23
Tabla 3. Calificación total de la Sección.	24
Tabla 4. Vías de las territoriales incluidas en los modelos.....	30
Tabla 5. Tabla ANOVA para la territorial Antioquia.....	51
Tabla 6. Tabla ANOVA para la territorial Bolívar.....	51
Tabla 7. Tabla ANOVA para la territorial Boyacá.....	51
Tabla 8. Tabla ANOVA para la territorial Caquetá	51
Tabla 9. Tabla ANOVA para la territorial Casanare	51
Tabla 10. Tabla ANOVA para la territorial Cauca	52
Tabla 11. Tabla ANOVA para la territorial Cesar	52
Tabla 12. Tabla ANOVA para la territorial Chocó	52
Tabla 13. Tabla ANOVA para la territorial Cundinamarca	52
Tabla 14. Tabla ANOVA para la territorial Guajira	52
Tabla 15. Tabla ANOVA para la territorial Huila.....	52
Tabla 16. Tabla ANOVA para la territorial Nariño	52
Tabla 17. Tabla ANOVA para la territorial Santander	52
Tabla 18. Tabla ANOVA para la territorial Sucre	53
Tabla 19. Tabla ANOVA para la territorial Tolima.....	53
Tabla 20. Tabla ANOVA para la territorial Valle.....	53
Tabla 21. Unidades de los datos de las variables utilizadas en los modelos de regresión lineal.....	54
Tabla 22. Pasos de la eliminación hacia atrás territorial Antioquia	57
Tabla 23. Pasos de la eliminación hacia atrás territorial Cauca.....	58
Tabla 24. Porcentajes de áreas de daños del tramo de la vía Turbo –Chigorodó de la territorial Antioquia que va del PR 4+0000 al PR 5+0000	59
Tabla 25. Porcentajes de áreas de daños del tramo de la vía Turbo –Chigorodó de la territorial Antioquia que va del PR 4+0000 al PR 5+0000 pasados a unidades de densidad	59
Tabla 26. Resumen modelos de regresión lineal Múltiple.....	61
Tabla 27. Paso 1 modelo logit territorial Antioquia.....	63
Tabla 28. Paso 2 modelo logit territorial Antioquia.....	63
Tabla 29. Paso 3 modelo logit territorial Antioquia.....	64
Tabla 30. Probabilidad de observar cada uno de los posibles valores de la variable Criterio Visual cuando las áreas de baches para la territorial Antioquia varían	66
Tabla 31. Probabilidad de observar cada uno de los posibles valores de la variable Criterio Visual cuando las áreas de fisuras para la territorial Antioquia varían	66
Tabla 32. Probabilidad de observar cada uno de los posibles valores de la variable Criterio Visual cuando las áreas de deformaciones para la territorial Antioquia varían.....	67



Tabla 33. Probabilidad de observar cada uno de los posibles valores de la variable Criterio Visual cuando los valores del ahuellamiento para la territorial Antioquia varían.....	68
Tabla 34. Resumen modelos logit ordinal.....	69
Tabla 35. Resumen de rangos de las categorías del Criterio Visual para los modelos logit.....	70
Tabla 36. Paso 1 modelo probit territorial Caquetá.....	71
Tabla 37. Paso 2 modelo probit territorial Caquetá.....	71
Tabla 38. Porcentajes de áreas de daños del tramo de la vía San José del Fragua - Florencia de la territorial Caquetá que va desde el PR 30+0000 al PR 31+000..	71
Tabla 39. Porcentajes de áreas de daños del tramo de la vía San José del Fragua - Florencia de la territorial Caquetá que va desde el PR 30+0000 al PR 31+000..	71
Tabla 40. Probabilidad de observar cada uno de los posibles valores de la variable Criterio Visual cuando las áreas de baches para la territorial Caquetá varían.....	73
Tabla 41. Probabilidad de observar cada uno de los posibles valores de la variable Criterio Visual cuando las áreas de fisuras para la territorial Caquetá varían.....	73
Tabla 42. Probabilidad de observar cada uno de los posibles valores de la variable Criterio Visual cuando las áreas de deformaciones para la territorial Caquetá varían.....	74
Tabla 43. Probabilidad de observar cada uno de los posibles valores de la variable Criterio Visual cuando las áreas de desprendimientos para la territorial Caquetá varían.....	75
Tabla 44. Probabilidad de observar cada uno de los posibles valores de la variable Criterio Visual cuando los valores del ahuellamiento para la territorial Antioquia varían.....	75
Tabla 45. Resumen modelos probit ordinal	77
Tabla 46. Resumen de rangos de las categorías del Criterio Visual para los modelos probit	78
Tabla 47. Comparación de los modelos logit y probit	79
Tabla 48. Paso a paso modelo de regresión lineal territorial Antioquia	84
Tabla 49. Paso a paso modelo de regresión lineal territorial Bolívar	84
Tabla 50. Paso a paso modelo de regresión lineal territorial Boyacá	85
Tabla 51. Paso a paso modelo de regresión lineal territorial Caquetá.....	85
Tabla 52. Paso a paso modelo de regresión lineal territorial Caquetá.....	85
Tabla 53. Paso a paso modelo de regresión lineal territorial Caquetá.....	86
Tabla 54. Paso a paso modelo de regresión lineal territorial Casanare.....	86
Tabla 55. Paso a paso modelo de regresión lineal territorial Cauca	87
Tabla 56. Paso a paso modelo de regresión lineal territorial César.....	87
Tabla 57. Paso a paso modelo de regresión lineal territorial Chocó	88
Tabla 58. Paso a paso modelo de regresión lineal territorial Cundinamarca	88
Tabla 59. Paso a paso modelo de regresión lineal territorial Huila	89
Tabla 60. Paso a paso modelo de regresión lineal territorial Nariño	89
Tabla 61. Paso a paso modelo de regresión lineal territorial Santander.....	90
Tabla 62. Paso a paso modelo de regresión lineal territorial Sucre	90
Tabla 63. Paso a paso modelo de regresión lineal territorial Tolima.....	91



Tabla 64. Paso a paso modelo de regresión lineal territorial Valle	91
Tabla 65. Paso a paso modelo de regresión lineal Colombia	92
Tabla 66. Modelo logit ordinal territorial Antioquia	93
Tabla 66. Modelo logit ordinal territorial Bolívar	93
Tabla 68. Modelo logit ordinal territorial Boyacá	94
Tabla 69. Modelo logit ordinal territorial Caquetá.....	94
Tabla 70. Modelo logit ordinal territorial Cesar	94
Tabla 71. Modelo logit ordinal territorial Cundinamarca.....	95
Tabla 71. Modelo logit ordinal territorial Huila	95
Tabla 73. Modelo logit ordinal territorial Nariño	95
Tabla 74. Modelo logit ordinal territorial Santander.....	95
Tabla 75. Modelo logit ordinal territorial Sucre.....	96
Tabla 75. Modelo logit ordinal territorial Tolima	96
Tabla 77. Modelo logit ordinal territorial Valle	96
Tabla 78. Modelo logit ordinal territorial Colombia	96
Tabla 79. Modelo probit ordinal territorial Antioquia.....	97
Tabla 80. Modelo probit ordinal territorial Bolívar.....	97
Tabla 81. Modelo probit ordinal territorial Boyacá.....	97
Tabla 82. Modelo probit ordinal territorial Caquetá	98
Tabla 83. Modelo probit ordinal territorial Cesar	98
Tabla 84. Modelo probit ordinal territorial Cundinamarca	98
Tabla 85. Modelo probit ordinal territorial Huila	98
Tabla 86. Modelo probit ordinal territorial Nariño	99
Tabla 87. Modelo probit ordinal territorial Santander	99
Tabla 88. Modelo probit ordinal territorial Sucre	99
Tabla 89. Modelo probit ordinal territorial Tolima	99
Tabla 90. Modelo probit ordinal territorial Valle.....	100
Tabla 91. Modelo probit ordinal territorial Colombia.....	100



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Formato presentación Criterio Técnico Parte 1.	25
Figura 2. Formato presentación Criterio Técnico Parte 2.	26
Figura 3. Calificación del estado de la superficie.	27
Figura 4. Formato presentación Criterio Técnico Parte 3.	28
Figura 5. Formato presentación Criterio Técnico Parte 4.	28
Figura 6. Formato presentación completo Criterio Técnico.	29
Figura 7. Criterio Visual Vs Criterio Técnico para las vías de la Territorial Antioquia	33
Figura 8. Criterio Visual Vs Criterio Técnico para las vías de la Territorial Bolívar .	33
Figura 9. Criterio Visual Vs Criterio Técnico para las vías de la Territorial Boyacá	34
Figura 10. Criterio Visual Vs Criterio Técnico para las vías de la Territorial Caquetá	34
Figura 11. Criterio Visual Vs Criterio Técnico para las vías de la Territorial Casanare	35
Figura 12. Criterio Visual Vs Criterio Técnico para las vías de la Territorial Cauca	35
Figura 13. Criterio Visual Vs Criterio Técnico para las vías de la Territorial Cesar.	36
Figura 14. Criterio Visual Vs Criterio Técnico para las vías de la Territorial Chocó	36
Figura 15. Criterio Visual Vs Criterio Técnico para las vías de la Territorial Cundinamarca.....	37
Figura 16. Criterio Visual Vs Criterio Técnico para las vías de la Territorial Huila ..	37
Figura 17. Criterio Visual Vs Criterio Técnico para las vías de la Territorial Nariño	38
Figura 18. Criterio Visual Vs Criterio Técnico para las vías de la Territorial Santander	38
Figura 19. Criterio Visual Vs Criterio Técnico para las vías de la Territorial Sucre .	39
Figura 20. Criterio Visual Vs Criterio Técnico para las vías de la Territorial Tolima	39
Figura 21. Criterio Visual Vs Criterio Técnico para las vías de la Territorial Valle ..	40
Figura 22. Diagrama de cajas territorial Antioquia	43
Figura 23. Diagrama de cajas territorial Bolívar	43
Figura 24. Diagrama de cajas territorial Boyacá	44
Figura 25. Diagrama de cajas territorial Caquetá.....	44
Figura 26. Diagrama de cajas territorial Casanare.....	45
Figura 27. Diagrama de cajas territorial Cauca.....	45
Figura 28. Diagrama de cajas territorial César.....	46
Figura 29. Diagrama de cajas territorial Chocó.....	46
Figura 30. Diagrama de cajas territorial Cundinamarca.....	47
Figura 31. Diagrama de cajas territorial Huila	47
Figura 32. Diagrama de cajas territorial Nariño.....	48
Figura 33. Diagrama de cajas territorial Santander.....	48
Figura 34. Diagrama de cajas territorial Sucre.....	49
Figura 35. Diagrama de cajas territorial Tolima	49
Figura 36. Diagrama de cajas territorial Valle	50



Figura 37. Probabilidad de observar cada uno de los posibles valores de la variable Criterio Visual cuando las áreas de baches para la territorial Antioquia varían.....	66
Figura 38. Probabilidad de observar cada uno de los posibles valores de la variable Criterio Visual cuando las áreas de fisuras para la territorial Antioquia varían.....	67
Figura 39. Probabilidad de observar cada uno de los posibles valores de la variable Criterio Visual cuando las áreas de fisuras para la territorial Antioquia varían.....	67
Figura 40. Probabilidad de observar cada uno de los posibles valores de la variable Criterio Visual cuando los valores del ahuellamiento para la territorial Antioquia varían.....	68
Figura 41. Probabilidad de observar cada uno de los posibles valores de la variable Criterio Visual cuando las áreas de baches para la territorial Caquetá varían.....	73
Figura 42. Probabilidad de observar cada uno de los posibles valores de la variable Criterio Visual cuando las áreas de fisuras para la territorial Antioquia varían.....	74
Figura 43. Probabilidad de observar cada uno de los posibles valores de la variable Criterio Visual cuando las áreas de fisuras para la territorial Caquetá varían.....	74
Figura 44. Probabilidad de observar cada uno de los posibles valores de la variable Criterio Visual cuando las áreas de desprendimientos para la territorial Caquetá varían	75
Figura 45. Probabilidad de observar cada uno de los posibles valores de la variable Criterio Visual cuando los valores del ahuellamiento para la territorial Antioquia varían.....	76



1 INTRODUCCIÓN

El desarrollo socioeconómico de una región se encuentra directamente relacionado con la infraestructura vial. Las vías hacen posible acceder a los mercados de productos y el traslado de todo tipo de mercancías, materias primas y productos elaborados; además facilitan el acceso de las personas a todos aquellos servicios que conllevan a una mejor calidad de vida y por ende a un alto desarrollo social. Por todo lo anterior se hace indispensable mantener en buen estado la Red Vial Nacional y conocer en qué momento se hace necesario rehabilitarla, hacerle mantenimiento o construir nueva infraestructura.

En Colombia, el Instituto Nacional de Vías –INVÍAS- es la entidad que ejecuta las políticas, estrategias, planes, programas y proyectos de la red de carreteras primarias y terciarias no concesionadas. Para evaluar las condiciones en que se encuentran dichas carreteras y poder tomar medidas tendientes a la construcción, reconstrucción, mejoramiento, rehabilitación, conservación, atención de emergencias, y demás obras que se requieran, se utilizan dos metodologías conocidas como el Criterio Visual y el Criterio Técnico. La primera corresponde a la caracterización subjetiva de una vía dada por un Administrador Vial que expresa el estado de transitabilidad de la misma; la segunda corresponde a una calificación ponderada que involucra dieciséis parámetros que tienen que ver con daños superficiales del pavimento (baches, fisuras, deformaciones, desprendimientos, ahuellamiento y otros daños) y con daños asociados con la funcionalidad y suficiencia de elementos de una vía tales como taludes inestables, señalización y drenaje.

La presente investigación está orientada a desarrollar modelos de Serviabilidad que reemplacen el Criterio Visual o calificación subjetiva por un índice numérico calculado a partir de variables físicas medibles (deterioros) o daños superficiales del pavimento que resulten estadísticamente significativos.

Para la determinación de los modelos se tendrá en cuenta información de las bases de datos del INVÍAS que registran las mediciones de las áreas afectadas por los distintos daños que se evalúan, así como la evaluación visual o cualitativa por cada tramo de vía. Con base en esta información y aplicando o ajustando modelos de regresión lineal múltiple, logit ordinal y probit ordinal se hará una selección de los parámetros estadísticamente significativos a incluir en los nuevos modelos matemáticos y el factor de ponderación o peso que le corresponde a cada uno.

Los nuevos modelos contribuirán a la determinación del estado de la red vial primaria, para luego priorizar en aquellos proyectos en materia de transporte e infraestructura que requieran de mayor inversión en el diseño, la construcción y la conservación.

1.1 OBJETIVOS

Los objetivos de la presente investigación son los siguientes:

- Desarrollar modelos matemáticos que permitan determinar la Serviciabilidad de las vías a cargo del Instituto Nacional de Vías –INVIAS-, a partir de la medición de las áreas de los daños de la superficie del pavimento y de la calificación cualitativa que le da a la vía un Administrador Vial teniendo en cuenta la comodidad y el confort que experimenta mientras la transita.
- Desarrollar indicadores de estado para determinar las condiciones en que se encuentra la Red Vial Nacional a cargo del INVIAS, que orienten la programación de actividades de mantenimiento y/o reparación.
- Identificar cuáles son los daños que más inciden en la percepción de transitabilidad de los usuarios de las vías en Colombia, para luego priorizar proyectos de intervención enfocados a dichos daños.

1.2 HIPOTESIS

Para esta investigación se plantearon las siguientes hipótesis:

- Es posible mediante modelos de regresión lineal múltiple, logit ordinal y probit ordinal, correlacionar diferentes daños de un pavimento con la percepción que tiene un Administrador Vial acerca de su transitabilidad, y de esta manera obtener una calificación que permita determinar si una vía se encuentra en estado bueno, regular o malo.
- Es posible relacionar la transitabilidad de las vías a cargo del INVIAS con los daños relacionados directamente con la superficie de las mismas, tales como baches, fisuras, deformaciones, desprendimientos, ahuellamiento y otros daños.

1.3 CONTRIBUCIONES

Al finalizar esta investigación se espera definir modelos para la evaluación de la Serviciabilidad de las vías en Colombia, que describan de una manera acertada y confiable su estado, convirtiéndose en una herramienta clave para que las entidades gubernamentales puedan priorizar su inversión en proyectos de infraestructura vial que aporten al desarrollo socioeconómico del país.



1.4 ESTRUCTURA Y CONTENIDO

El presente documento de aquí en adelante se estructura como se describe a continuación:

- **CAPITULO 2:** Se realiza una revisión teórica acerca de la serviciabilidad, de los primeros aportes que se hicieron a este concepto, y de otros proyectos similares a este que se han desarrollado en otras partes del mundo. Además se describe la metodología que actualmente utiliza el INVIAS para calificar las vías bajo su administración, y la forma detallada como se determinan tanto el Criterio Visual como el Criterio Técnico.
- **CAPITULO 3:** Se presentan las especificaciones que se tuvieron en cuenta para implementar los modelos de regresión lineal, logit ordinal y probit ordinal.
- **CAPITULO 4:** Se analizan los resultados obtenidos en las estimaciones de los modelos.
- **CAPITULO 5:** Se reseñan las conclusiones y recomendaciones alrededor de los resultados obtenidos en la estimación de modelos, se identifican los alcances y limitaciones del estudio, al igual que se brindan unas pautas y/o recomendaciones dirigidas a futuras iniciativas de desarrollo de estudios similares.

2. MARCO CONCEPTUAL

2.1 SERVICIABILIDAD DE UNA VÍA

La Serviciabilidad de un pavimento se define como la percepción de la calidad, seguridad y confort que experimenta el usuario de una vía al transitarla.

La Serviciabilidad es determinada a través de modelos de regresión lineal multivariada en los que se correlacionan diferentes características físicas del pavimento (García-Díaz et al, 1984), con el promedio de las percepciones que tienen los usuarios sobre la comodidad que experimentan al transitarlo. (Moore et al, 1987, García-Díaz et al, 1984).

El objetivo que se alcanza al desarrollar modelos de Serviciabilidad basados en propiedades físicas del pavimento, es el de evaluar la percepción global de la calidad que tienen los usuarios del mismo, basándose en parámetros objetivos y no en dispendiosas encuestas que resulta costoso hacerlas.

Las características físicas de los pavimentos que originalmente fueron consideradas en los modelos de Serviciabilidad fueron: rugosidad, ahuellamiento y cantidad de grietas y parcheo superficial (Huang, 2003).

2.1.1 Índice De Serviciabilidad Presente o PSI

La medida primaria de la Serviciabilidad es el Índice de Serviciabilidad Presente (PSI, Present Serviciability Index), el cual está orientado mundialmente a cuantificar por medio de fórmulas matemáticas que combinan diferentes factores de deterioro, la percepción cualitativa del usuario sobre la calidad del ruedo de la carretera. Esta ecuación original está dada por la Ecuación (1):

$$PSI = 5.03 - 1.91 \log(1 + SV) - 1.38(RD)^2 - 0.01(C + P)^{0.5} \quad (1)$$

Dónde:

SV=Varianza del perfil sobre la sección en estudio medida con el perfilómetro CHLOE, x 10 (pulg/pie)²

RD = profundidad de ahuellamiento medio, pulg

C = piel de cocodrilo, clase 2 y clase 3 (pies²/1000pies²). Clase 2 significa que todas las fisuras se han unido para formar la piel de cocodrilo. Clase 3 se indica cuando algunos trozos del cuarteado resultante han desaparecido

P = parches (pies²/ 1000pies)

Según la Guía de Diseño de la AASHTO-93, el Índice de Serviciabilidad (PSI) de una vía se mide en una escala del cero (0) a cinco (5); una calificación de cero indica que la vía se encuentra en estado intransitable y una calificación de cinco indica que la vía está en perfectas condiciones (Véase la Tabla 1)



Tabla 1. Calificación de una vía de acuerdo a su Índice de Serviabilidad.

Índice de Serviabilidad(PSI)	Calificación
5-4	Muy Buena
4-3	Buena
3-2	Regular
2-1	Mala
1-0	Muy Mala

A continuación se presenta una descripción general de las características físicas de los pavimentos utilizadas en los modelos originales de serviabilidad.

- Rugosidad:** La Rugosidad se define como las irregulares en la superficie del pavimento (Perfil) que afectan adversamente la calidad de rodado, seguridad y costos de operación del vehículo (H. de Solminihac, 2005, Sayers, 1995, y Sayers et al, 1986). La rugosidad induce una respuesta dinámica a los vehículos que puede generar percepciones de incomodidad en los usuarios al transitar por una vía (Fuentes et al, 2010). Originalmente la rugosidad fue evaluada en los modelos de Serviabilidad a través del parámetro Mean Slope Variance (Carey y Irick, 1960). El parámetro Mean Slope Variance representa la varianza de la pendiente longitudinal evaluada con el perfilómetro CHLOE. Investigaciones posteriores al gran experimento de la AASHO demostraron que el parámetro de rugosidad evaluado por el perfilómetro CHLOE presentaba ciertas deficiencias (Scrivner, 1964). En el proceso de seleccionar un parámetro de rugosidad adecuado, los investigadores encontraron problemas al tratar de evaluar superficies de pavimentos debido a la gran diversidad de equipos, técnicas e indicadores de rugosidad que existen. Esta diversidad generó problemas en los procesos comparativos entre los parámetros obtenidos por los diferentes equipos. Estas necesidades dieron lugar a la celebración del experimento internacional denominado International Road Roughness Experiment (IRRE), en el cual se desarrolló el concepto y la metodología para el cálculo del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) (Sayers, 1995, Sayers et al, 1986, y ASTM E1926-08). El Índice de Rugosidad Internacional representa un parámetro potable capaz de evaluar las propiedades de rugosidad de una superficie de pavimento independientemente del equipo utilizado para evaluar el perfil de la vía. El IRI consiste en un modelo vibracional que modela un cuarto de vehículo (Quarter Car Model) haciendo uso de dos grados dinámicos de libertad. El modelo simula un cuarto de carro con parámetros dinámicos estándar que transita por el perfil de pavimento, previamente evaluado, a una velocidad constante de 80 Km/h. Resientes investigaciones han identificado a el IRI como el parámetro más importante a ser considerado en los modelos de Serviabilidad (Shafizadeh et al, 2002, Paterson, 1987, Al-Omari et al, 1994, y Dujisin, 1995).



- **Ahuellamiento:** El ahuellamiento representa deformaciones plásticas (depresiones) en la zona de circulación del tráfico (Shafizadeh et al, 2002). Representa un tipo de deterioro característico de pavimentos flexibles. El ahuellamiento es evaluado en los modelos de Serviciabilidad a través del parámetro Rut Mean Depth (RD), el cual cuantifica en ahuellamiento promedio del tramo de vía sujeto al estudio.
- **Cantidad de Grietas y Parcheo Superficial:** La Cantidad de Grietas y Parcheo Superficial fue evaluada originalmente cuantificando las densidades presentes de estos deterioros en el área total del tramo de vía sujeto al estudio (Carey y Irick, 1960). Actualmente se encuentran disponibles parámetros más completos en cuanto a la información que estos representan sobre la condición del pavimento. Uno de estos parámetros es el Pavement Condition Index (PCI) desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los Estados Unidos (US Army Corps of Engineering) (Shahin, 2005). Este parámetro involucra no solo las densidades sino los tipos y grados de severidad de los deterioros encontrados en el tramo de vía sujeto al estudio.

2.1.1 Antecedentes en el desarrollo de modelos de serviciabilidad

A finales de la década de 1950 los investigadores Carey e Irick introdujeron el concepto de Serviciabilidad como producto de los resultados y observaciones del desarrollo de la prueba AASHO (American Association of State Highway Officials) (Carey e Irick, 1960, AASHO, 1962). Esta prueba consistió en un panel conformado por 100 usuarios que evaluaron subjetivamente la condición de diferentes pavimentos en los estados de Illinois, Indiana, y Minnesota; utilizando una escala de 0 a 5, siendo 5 la condición perfecta. Inicialmente se definió el concepto “Calificación de la Condición Presente del Pavimento (Present Serviciability Rating, PSR)”, el cual evalúa el promedio de las evaluaciones recogidas en el panel. Los modelos de Serviciabilidad fueron desarrollados al correlacionar estadísticamente los PSR con los diferentes parámetros que evalúan las características físicas del pavimento. Estos modelos tienen como objeto el cálculo del Índice de Serviciabilidad Presente (Present Serviciability Index, PSI), el cual es utilizado como parámetro fundamental en el proceso de diseño de pavimentos.

Nakamura (1963), a partir de los estudios anteriormente mencionados definió la Serviciabilidad Presente como la capacidad de un pavimento para servir el tránsito para el cual fue diseñado, y realizó un estudio en donde comparó el PSI otorgado a una cantidad de secciones de pavimento rígido y flexible por personas con conocimientos sobre pavimentos, con el otorgado por personas del común.

Desde entonces, numerosas investigaciones se han planteado y desarrollado en el intento de predecir el desempeño y comportamiento de pavimentos y a fin de calibrar modelos de Serviciabilidad a partir de características físicas, entre las cuales se mencionan las más generales: rugosidad, deterioros superficiales, tipo de vehículo y tipo de pavimento.

En el año 2002 Prozzi & Madanat desarrollaron en California un modelo no lineal para la predicción del comportamiento del pavimento en función de las características del tráfico, las propiedades estructurales del pavimento y las condiciones ambientales.

En el 2003 De Solminihac, et al. desarrollaron en Chile la investigación “análisis de Serviciabilidad de pavimentos para el método diseño AASHTO: el caso chileno”. Este estudio muestra la relación que existe entre los resultados de Serviciabilidad obtenidos por un panel de evaluación conformado por 9 miembros que representaban a los usuarios comunes de las vías típicas de Chile, y los parámetros (en particular la rugosidad) medidos con instrumentos en 30 secciones de carretera de concreto asfáltico, 25 secciones de concreto de cemento Portland, y en 11 secciones compuestas de una sobrecarpeta asfáltica.

Los resultados mostraron que la predicción de la Serviciabilidad es muy precisa cuando se basa en la evaluación de la rugosidad. Además los datos mostraron que en comparación con los estudios realizados en países desarrollados, los chilenos son al parecer más tolerantes al momento de asignar un rango de calificación a la calidad de las vías. Por otra parte, deterioros visibles no tienen una influencia significativa en los valores de Serviciabilidad para los usuarios chilenos.

En este estudio se desarrolló una relación entre el Índice Internacional de Rugosidad (IRI) y la Serviciabilidad, como es definido por la AASHTO. Se obtuvieron resultados para la condición final de pavimentos urbanos, IRI-final asfalto = 5.9 m/km e IRI- final hormigón = 8.1 m/km.

Otra investigación que vale la pena resaltar fue la realizada en Alberta Transportation Highway Asset Management (AT-HAM) donde utilizan el Índice Internacional de Rugosidad (IRI) como índice de capacidad de servicio de sus autopistas. Este parámetro se mide en las principales carreteras primarias de la ciudad cada año, y la información recogida y la de otros deterioros se utiliza para calificar las carreteras y dar prioridad para su rehabilitación y/o mantenimiento. En este estudio, los últimos datos disponibles de IRI fueron utilizados para evaluar la Serviciabilidad de las principales carreteras de Alberta y se estudiaron factores importantes como la edad, los suelos de la sub-rasante, zonas climáticas y el tráfico, para investigar las razones principales de la baja Serviciabilidad de algunas secciones de pavimento. (Soleymani, Keettikkal, & Igorevich, 2002).



Por medio de la presente investigación se busca desarrollar modelos de Serviabilidad ajustados al entorno sociocultural colombiano con el fin de proporcionar estructuras viales competentes que garanticen seguridad a sus usuarios.

2.3 EVALUACIÓN DEL ESTADO DE LA RED VIAL A CARGO DEL INVÍAS

En Colombia también se han desarrollado metodologías para la calificación de su red vial; el INVÍAS, entidad encargada en el país de la gestión vial, con el fin de evaluar en detalle el estado de las carreteras bajo su supervisión ha desarrollado dos criterios: El Criterio Visual y el Criterio Técnico.

La red vial se ha sectorizado por regiones denominadas Direcciones Territoriales que coinciden con los diferentes departamentos del territorio nacional. Cada una de las territoriales se encuentra bajo la responsabilidad de un Administrador Vial, que de acuerdo al documento CONPES 3396 de noviembre de 2005, son profesionales contratados para efectuar el control del mantenimiento vial y adelantar las gestiones de planeación, inspección de puentes y recopilación de información para las bases de datos de INVÍAS.

En un principio se determinó que los Administradores ejecutarían actividades teniendo en cuenta las necesidades y las características de las carreteras como por ejemplo: la conservación, el inventario físico y estado de vías, la recolección de información para la base de datos de los sistemas de administración vial, la atención de emergencias, la ejecución de algunos estudios y el inventario de accidentes, entre otras.

Posteriormente, se añadieron acciones en pro de la recuperación del espacio público vial, la descontaminación visual, la eliminación de basureros, la atención de usuarios y evaluaciones estructurales y funcionales de pavimentos, así como estudios de tránsito y perfiles de vulnerabilidad, levantamiento de la información georreferenciada de la vía, con el propósito de elaborar y actualizar constantemente la cartografía de toda la red vial de Colombia. Hoy en día, los profesionales a cargo de la administración de la malla vial, además de las actividades mencionadas anteriormente, son veedores de los contratos que se realizan en cada una de las vías para así determinar la calidad y estabilidad de las obras, y en caso de ser necesario, solicitar la aplicación de las pólizas que los amparan.

2.3.1 Criterio Visual

El Criterio Visual corresponde a la caracterización subjetiva de una vía dada por un Administrador Vial y refleja el estado de transitabilidad y/o confort de la misma.

El INVÍAS ha unificado esta evaluación en tres estados: Bueno, Regular o Malo. Esta valoración se realiza trimestralmente para cada una de las Territoriales.

2.3.2 Criterio Técnico

El Criterio Técnico corresponde a la ponderación de dieciséis parámetros relacionados con el estado superficial de una vía, drenajes, zonas laterales y señalización de la misma. Dichos parámetros y los porcentajes o pesos establecidos para ellos se muestran a continuación en la Tabla 2; la sumatoria total de todos ellos debe ser igual al 100%. La calificación final del estado de la vía en estudio se asigna de acuerdo a la Tabla 3.

Tabla 2. Porcentajes o pesos establecidos para las calificaciones de los parámetros evaluados en el Criterio Técnico

	1. PARÁMETRO	2. FACTOR DE PONDERACIÓN	3. ÁREA DAÑADA (%)	4. CALIFICACIÓN PARCIAL
CALZADA	BACHES	20.00%	0	5.00
			0.1 - 5.0	3.80
			5.1 - 10.0	3.00
			10.1 - 15.0	2.50
			mayor a 15.0	1.00
	FISURAS	12.00%	0	5.00
0.1 - 5.0			3.80	
5.1 - 10.0			3.00	
10.1 - 15.0			2.50	
mayor a 15.0			1.00	
DEFORMACIONES (Asentamientos, abultamientos, media luna, desplazamiento de borde, depresiones o hundimientos)	16.00%	0	5.00	
		0.1 - 5.0	3.80	
		5.1 - 10.0	3.00	
		10.1 - 20.0	2.50	
		mayor a 20.0	1.00	
DESPRENDIMIENTOS (Descascaramiento, pérdida de ligante, pérdida de agregados, desprendimiento de borde)	8.00%	0	5.00	
		0.1 - 5.0	3.80	
		5.1 - 10.0	3.00	
		10.1 - 20.0	1.50	
		mayor a 20.0	0.00	
AHUELLAMIENTO	8.00%	Ahuellamiento promedio (mm)		
		0	5.00	
		0.1 - 5.0	4.50	
		5.1 - 20.0	3.50	
		20.1 - 40.0	2.00	
OTROS DAÑOS (Cabezas duras, pulimento, exudación, afloramiento)	8.00%	0	5.00	
		0.1 - 5.0	3.75	
		5.1 - 10.0	3.50	
		10.1 - 25.0	2.50	
		mayor a 25.0	0.00	
BERMAS	DAÑOS TOTALES	8.00%	0	5.00
			0.1 - 5.0	3.80
			5.1 - 10.0	1.30
			10.1 - 15.0	0.60



DRENAJES	CUNETAS	Funcionalidad	2.25%	mayor a 15.0 0.00 NOTA: Si no existen bermas o no están pavimentadas, la calificación será la mínima (0)
		Suficiencia	1.50%	
	ALCANTARILLAS	Funcionalidad	2.63%	
		Suficiencia	1.13%	
ZONAS LATERALES	TALUDES INESTABLES	5.00%		
SEÑALIZACIÓN	VERTICAL	Estado	1.50%	
		Suficiencia	1.50%	
	HORIZONTAL	Estado	2.25%	
		Suficiencia	2.25%	

Fuente: INVIAS

Tabla 3. Calificación total de la Sección.

CALIFICACIÓN CUANTITATIVA	CALIFICACIÓN CUALITATIVA
<=2	Muy malo
Entre 2 y 3.5	Malo
Entre 3.5 y 4	Regular
Entre 4 y 4.5	Bueno
Entre 4.5 y 5	Muy bueno

Fuente: INVIAS

- **Procedimiento para el cálculo del Criterio Técnico.** El procedimiento a seguir para el cálculo del Criterio Técnico se muestra a continuación a partir de un ejemplo para un tramo de vía de la territorial César. Los pasos a seguir son:

1. Se divide el tramo de vía en secciones de un kilómetro de distancia, se determina el ancho de cada sección y luego su área; además se establece si hay o no bermas y pontones. Esta información se organiza como se muestra en la Figura 1. Por ejemplo la sección comprendida entre el PR 0+0000 y el PR 1+0000, tiene un área de sección de 7161 m² y tiene puentes pero no bermas.

2. Se estima el área de la sección que se encuentra dañada por baches; de igual manera se hace para las fisuras, las deformaciones, los desprendimientos, el ahuellamiento y otros daños. También se determina el área de las bermas que se encuentra dañada.

3. Se calcula el porcentaje que representan cada una de las áreas anteriores con respecto al área total de la sección. La información obtenida se consigna en un formato como el mostrado en la Figura 2. Por ejemplo la sección de vía comprendida entre el PR 0+0000 y el PR 1+0000 no tiene área dañada por baches, ni por desprendimientos, ahuellamiento, ni otros daños. Sin embargo, presenta 1000m² dañados por fisuras correspondientes al 13.96% del área total y 350m² dañados por deformaciones correspondientes al 4.89%.



PR		Distancia	Ancho Sección	Area Sección	Bermas (Si / No)	Puentes (Si / No)
Inicial	Final					
		(m)	(m)	(m2)		

0 + 0000	1 + 0000	1,023	7.0	7,161.0	No	si
1 + 0000	2 + 0000	1,008	7.0	7,056.0	No	No
2 + 0000	3 + 0000	996	7.0	6,972.0	No	No

Figura 1. Formato presentación Criterio Técnico Parte 1.



PR		Distancia (m)	Daños en la calzada					Bermas	
Inicial	Final		Area Dañada Baches (m2) / %	Area Fisuras (m2) / %	Area Deformac (m2) / %	Area Desprendim (m2) / %	Ahuella Promd Ahuellamiento (mm)	Otros Daños (m2) / %	Area Dañada (m2) / %
0 + 0000	1 + 0000	1,023	0	1000	350	0		0	7161
			0.00%	13.96%	4.89%	0.00%	0	0.00%	100.00%
1 + 0000	2 + 0000	1,008	0	1200	100	0		0	7056
			0.00%	17.01%	0.00%	0.00%	0	0.00%	100.00%
2 + 0000	3 + 0000	996	0	100	100	0		50	6972
			0.00%	1.43%	1.43%	0.00%	0		

Porcentaje de área dañada por fisuras con respecto al área total.

Figura 2. Formato presentación Criterio Técnico Parte 2.

Área dañada por fisuras en m².

4. El INVIAS ha establecido calificaciones parciales comprendidas entre cero (0) y cinco (5) para cada uno de los porcentajes de área afectada por los daños asociados al estado de la superficie. Esta calificación se detalla en la Figura 3, y es el valor que se toma en cuenta para realizar la ponderación que finalmente define el resultado del Criterio Técnico para determinada sección de vía. El procedimiento a seguir para convertir de porcentaje de área afectada a valores comprendidos entre cero (0) y cinco (5), consiste en buscar en la tabla de “calificación del estado de la superficie” en la columna llamada x los porcentajes obtenidos en el paso anterior para cada uno de los daños y luego asignar su correspondiente calificación. Por ejemplo, para un área del 0.2% del área total, afectada por deformaciones, se tiene una calificación de 3.8.



CALIFICACION DEL ESTADO DE LA SUPERFICIE										Vías Pavimentadas			CALIFICACION DEL ESTADO DE LA SUPERFICIE										Vías No Pavimentadas		
BACHES													BACHES												
BACHES	FISURAS		DEFORMACIONES		DESPRENDIMIENTOS		AHUELLAMIENTO		OTROS DAÑOS		BERMA				A Erosionada		A Ondulaciones o rizados		Ahuellamiento						
%	%	%	%	%	%	mm	mm	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	mm	mm	mm	mm			
0.0%	5.0	0.0%	5.0	0.0%	5.0	0.0%	5.0	0.0%	5.00	0.0%	5.0	0.0%	5.0	0.00	5.0	0.0%	5.0	0.0%	5.0	0.00	5.0	0.00	5.0		
0.1%	3.8	0.1%	3.8	0.1%	3.8	0.1%	3.8	0.1%	3.75	0.1%	3.8	0.1%	3.8	0.1%	3.8	0.1%	3.8	0.1%	3.8	0.10	3.8	0.10	4.0		
0.2%	3.8	0.2%	3.8	0.2%	3.8	0.2%	3.8	0.2%	3.75	0.2%	3.8	0.2%	3.8	0.2%	3.8	0.2%	3.8	0.2%	3.8	0.20	3.8	0.20	4.0		
0.3%	3.8	0.3%	3.8	0.3%	3.8	0.3%	3.8	0.3%	3.75	0.3%	3.8	0.3%	3.8	0.3%	3.8	0.3%	3.8	0.3%	3.8	0.30	3.8	0.30	4.0		
0.4%	3.8	0.4%	3.8	0.4%	3.8	0.4%	3.8	0.4%	3.75	0.4%	3.8	0.4%	3.8	0.4%	3.8	0.4%	3.8	0.4%	3.8	0.40	3.8	0.40	4.0		
0.5%	3.8	0.5%	3.8	0.5%	3.8	0.5%	3.8	0.5%	3.75	0.5%	3.8	0.5%	3.8	0.5%	3.8	0.5%	3.8	0.5%	3.8	0.50	3.8	0.50	4.0		
0.6%	3.8	0.6%	3.8	0.6%	3.8	0.6%	3.8	0.6%	3.75	0.6%	3.8	0.6%	3.8	0.6%	3.8	0.6%	3.8	0.6%	3.8	0.60	3.8	0.60	4.0		
0.7%	3.8	0.7%	3.8	0.7%	3.8	0.7%	3.8	0.7%	3.75	0.7%	3.8	0.7%	3.8	0.7%	3.8	0.7%	3.8	0.7%	3.8	0.70	3.8	0.70	4.0		
0.8%	3.8	0.8%	3.8	0.8%	3.8	0.8%	3.8	0.8%	3.75	0.8%	3.8	0.8%	3.8	0.8%	3.8	0.8%	3.8	0.8%	3.8	0.80	3.8	0.80	4.0		
0.9%	3.8	0.9%	3.8	0.9%	3.8	0.9%	3.8	0.9%	3.75	0.9%	3.8	0.9%	3.8	0.9%	3.8	0.9%	3.8	0.9%	3.8	0.90	3.8	0.90	4.0		
1.0%	3.8	1.0%	3.8	1.0%	3.8	1.0%	3.8	1.0%	3.75	1.0%	3.8	1.0%	3.8	1.0%	3.8	1.0%	3.8	1.0%	3.8	1.00	3.8	1.00	4.0		
1.1%	3.8	1.1%	3.8	1.1%	3.8	1.1%	3.8	1.1%	3.75	1.1%	3.8	1.1%	3.8	1.1%	3.8	1.1%	3.8	1.1%	3.8	1.10	3.8	1.10	4.0		
1.2%	3.8	1.2%	3.8	1.2%	3.8	1.2%	3.8	1.2%	3.75	1.2%	3.8	1.2%	3.8	1.2%	3.8	1.2%	3.8	1.2%	3.8	1.20	3.8	1.20	4.0		
1.3%	3.8	1.3%	3.8	1.3%	3.8	1.3%	3.8	1.3%	3.75	1.3%	3.8	1.3%	3.8	1.3%	3.8	1.3%	3.8	1.3%	3.8	1.30	3.8	1.30	4.0		
1.4%	3.8	1.4%	3.8	1.4%	3.8	1.4%	3.8	1.4%	3.75	1.4%	3.8	1.4%	3.8	1.4%	3.8	1.4%	3.8	1.4%	3.8	1.40	3.8	1.40	4.0		
1.5%	3.8	1.5%	3.8	1.5%	3.8	1.5%	3.8	1.5%	3.75	1.5%	3.8	1.5%	3.8	1.5%	3.8	1.5%	3.8	1.5%	3.8	1.50	3.8	1.50	4.0		
1.6%	3.8	1.6%	3.8	1.6%	3.8	1.6%	3.8	1.6%	3.75	1.6%	3.8	1.6%	3.8	1.6%	3.8	1.6%	3.8	1.6%	3.8	1.60	3.8	1.60	4.0		
1.7%	3.8	1.7%	3.8	1.7%	3.8	1.7%	3.8	1.7%	3.75	1.7%	3.8	1.7%	3.8	1.7%	3.8	1.7%	3.8	1.7%	3.8	1.70	3.8	1.70	4.0		
1.8%	3.8	1.8%	3.8	1.8%	3.8	1.8%	3.8	1.8%	3.75	1.8%	3.8	1.8%	3.8	1.8%	3.8	1.8%	3.8	1.8%	3.8	1.80	3.8	1.80	4.0		
1.9%	3.8	1.9%	3.8	1.9%	3.8	1.9%	3.8	1.9%	3.75	1.9%	3.8	1.9%	3.8	1.9%	3.8	1.9%	3.8	1.9%	3.8	1.90	3.8	1.90	4.0		
2.0%	3.8	2.0%	3.8	2.0%	3.8	2.0%	3.8	2.0%	3.75	2.0%	3.8	2.0%	3.8	2.0%	3.8	2.0%	3.8	2.0%	3.8	2.00	3.8	2.00	4.0		
2.1%	3.8	2.1%	3.8	2.1%	3.8	2.1%	3.8	2.1%	3.75	2.1%	3.8	2.1%	3.8	2.1%	3.8	2.1%	3.8	2.1%	3.8	2.10	3.8	2.10	4.0		
2.2%	3.8	2.2%	3.8	2.2%	3.8	2.2%	3.8	2.2%	3.75	2.2%	3.8	2.2%	3.8	2.2%	3.8	2.2%	3.8	2.2%	3.8	2.20	3.8	2.20	4.0		
2.3%	3.8	2.3%	3.8	2.3%	3.8	2.3%	3.8	2.3%	3.75	2.3%	3.8	2.3%	3.8	2.3%	3.8	2.3%	3.8	2.3%	3.8	2.30	3.8	2.30	4.0		
2.4%	3.8	2.4%	3.8	2.4%	3.8	2.4%	3.8	2.4%	3.75	2.4%	3.8	2.4%	3.8	2.4%	3.8	2.4%	3.8	2.4%	3.8	2.40	3.8	2.40	4.0		
2.5%	3.8	2.5%	3.8	2.5%	3.8	2.5%	3.8	2.5%	3.75	2.5%	3.8	2.5%	3.8	2.5%	3.8	2.5%	3.8	2.5%	3.8	2.50	3.8	2.50	4.0		
2.6%	3.8	2.6%	3.8	2.6%	3.8	2.6%	3.8	2.6%	3.75	2.6%	3.8	2.6%	3.8	2.6%	3.8	2.6%	3.8	2.6%	3.8	2.60	3.8	2.60	4.0		
2.7%	3.8	2.7%	3.8	2.7%	3.8	2.7%	3.8	2.7%	3.75	2.7%	3.8	2.7%	3.8	2.7%	3.8	2.7%	3.8	2.7%	3.8	2.70	3.8	2.70	4.0		
2.8%	3.8	2.8%	3.8	2.8%	3.8	2.8%	3.8	2.8%	3.75	2.8%	3.8	2.8%	3.8	2.8%	3.8	2.8%	3.8	2.8%	3.8	2.80	3.8	2.80	4.0		
2.9%	3.8	2.9%	3.8	2.9%	3.8	2.9%	3.8	2.9%	3.75	2.9%	3.8	2.9%	3.8	2.9%	3.8	2.9%	3.8	2.9%	3.8	2.90	3.8	2.90	4.0		
3.0%	3.8	3.0%	3.8	3.0%	3.8	3.0%	3.8	3.0%	3.75	3.0%	3.8	3.0%	3.8	3.0%	3.8	3.0%	3.8	3.0%	3.8	3.00	3.8	3.00	4.0		
3.1%	3.8	3.1%	3.8	3.1%	3.8	3.1%	3.8	3.1%	3.75	3.1%	3.8	3.1%	3.8	3.1%	3.8	3.1%	3.8	3.1%	3.8	3.10	3.8	3.10	4.0		

Figura 3. Calificación del estado de la superficie.

Como se puede ver en la Figura 4, para el 13.96% de área dañada por fisura la calificación es 2.5 y para el 4.89% de área dañada por deformaciones es 3.8.



PR		Distancia (m)	Estado de la Superficie						
Inicial	Final		Calificación Parcial / Calificación Ponderada						
			Daños						
			Baches	Fisuras	Deformaciones	Desprendimientos	Ahuellamiento	Otros Daños	Bermas
			20.0%	12.0%	16.0%	8.0%	8.0%	8.0%	8.0%
0 + 0000	1 + 0000	1,023	1.00000	0.30000	0.60800	0.40000	0.40000	0.40000	0.00000
			5.0	2.5	3.8	5	5	5	0
1 + 0000	2 + 0000	1,008	1.00000	0.12000	0.80000	0.40000	0.40000	0.40000	0.00000
			5.0	1	5	5	5	5	0
2 + 0000	3 + 0000	996	1.00000	0.45600	0.60800	0.40000	0.40000	0.30000	0.00000
			5.0	3.8	3.8	5	5	3.75	0

Factores de ponderación o pesos

Figura 4. Formato presentación Criterio Técnico Parte 3.

Las calificaciones obtenidas en el paso anterior para cada uno de los parámetros evaluados por el Criterio Técnico se multiplican por sus respectivos factores de ponderación, los cuales se pueden apreciar en la Tabla 2 o en el formato del Criterio Técnico (Figura 4). Los productos obtenidos al final se sumarán y con el resultado será posible calificar la sección de vía según las categorías establecidas en la Tabla 3.

PR		Distancia (m)	Calificación Total de la Sección	
Inicial	Final			Estado

100.0%

0 + 0000	1 + 0000	1,023	3.96	Regular
----------	----------	-------	------	---------

Calificación final de la sección de vía.

Figura 5. Formato presentación Criterio Técnico Parte 4.

Por ejemplo como se puede ver en la Figura 5, la calificación total de la sección de vía comprendida entre el PR 0+0000 y el PR 1+0000 fue de 3.96, valor que la califica como en estado Regular. El procedimiento mencionado anteriormente se realiza igual para cada una de las secciones de vía.

3 ESPECIFICACIÓN DE LOS MODELOS

3.1 DATOS

Para el desarrollo de la presente investigación se utilizaron datos correspondientes a las evaluaciones realizadas por Administradores Viales del Invia a 3270 tramos, tanto del Criterio Visual como del Criterio Técnico. A continuación se presentan las vías de cada territorial que han servido de base para el desarrollo de los modelos a presentar en el actual informe.

Tabla 4. Vías de las territoriales incluidas en los modelos.

TERRITORIAL	TRAMOS
ANTIOQUIA	TURBO – CHIGORODÓ
	CHIGORODÓ – DABEIBA
	BOLOMBOLO - SANTA FE DE ANTIOQUIA
	DABEIBA - SANTA FE DE ANTIOQUIA
	SANTA FE DE ANTIOQUIA -PUENTE AURRA
BOLÍVAR	SINCELEJO – CALAMAR
	LA BODEGA – MOMPOX
	MOMPOX – GUAMAL
	EL CARMEN – PLATO
	PUERTA DE HIERRO-MAGANGUE-YATI
	CARRETO - CRUZ DEL VISO
	CARMEN DE BOLÍVAR - CARRETO – CALAMAR
	CARTAGENA - LOS LÍMITES
VARIANTE MAMONAL GAMBOTE	
	VARIANTE DE CARTAGENA Y ACCESOS
BOYACÁ	PIEDRAGORDA – CHIQUINQUIRÁ
	CHIQUINQUIRÁ – TUNJA
	BARBOSA – TUNJA
	BELÉN – SÁCAMA
	SOGAMOSO - EL CRUCERO
	DUITAMA-LA PALMERA
CAQUETÁ	DEPRESION EL VERGEL – FLORENCIA
	FLORENCIA - PUERTO RICO
	SAN JOSÉ DEL FRAGUA-FLORENCIA
	SANTO DOMINGO - MINA BLANCA
CASANARE	SOGAMOSO – AGUAZUL
	MONTERREY – YOPAL
CAUCA	MORALES - PIENDAMO
	PIENDAMO - SILVIA – TOTORO
CÉSAR	VALLEDUPAR - RIO SECO - SAN JUAN DEL CESAR
	PUEBLO NUEVO - BOSCONIA – VALLEDUPAR
	SAN ROQUE - LA PAZ
	SAN JOSE - YE DE ARJONA
	YE DE ARJONA – CUATROVIENTOS
	CUATROVIENTOS – CODAZZI
CHOCÓ	CERTEGUI – QUIBDO
	CERTEGUI – QUIBDO
	QUIBDO - LA MANSA
CUNDINAMARCA	BRICENO T DE NEMOCON
	CHOCONTA – GUATEQUE

	CRUCE RUTA 55 (DESVIO CRUCE RUTA 56) EL PORTAL - EL ANTOJO PUENTE REAL - CAQUEZA - PUENTE TELLEZ COLOMBIA 86 - CHOACHI – UBAQUE
HUILA	VARIANTE DE PITALITO RIO MAZAMORRAS - LA PORTADA MOCOA – PITALITO GARZON – NEIVA ORRPIHUASSI - QUEBRADA LAS DORADAS PUERTO NOLASCO –NÁTAGA TESALIA – TERUEL VARIANTE DE PITALITO GARZON - NEIVA, SECTOR GARZÓN – GUASIMILLAS VARIANTE GARZON
NARIÑO	GUACHUCAL – IPIALES JUNIN- PEDREGAL PASTO - BUESACO – HIGUERONES SANTA BARBARA PASTO
SANTANDER	LA PALMERA – PRESIDENTE MALAGA-GUACA BUCARAMANGA - SAN ALBERTO BUCARAMANGA – CUESTABOBA LA LIZAMA - SAN ALBERTO
SUCRE	COVEÑAS – SABANETA GUAYEPO - MAJAGUAL – ACHÍ COVEÑAS - SAN ONOFRE
TOLIMA	HONDA - RÍO ERMITAÑO
VALLE	ANSERMANUEVO – CARTAGO CALI - CRUCE RUTA 40 (LOBOGUERRERO) POPAYAN – CALI SANTANDER DE Q. - FLORIDA – PALMIRA

3.2 ANÁLISIS DESCRIPTIVO: DIAGRAMAS DE DISPERSIÓN

Al obtener la calificación del estado de una vía a partir del Criterio Técnico esta corresponde a un número comprendido entre cero y cinco, y si es obtenida a partir del Criterio Visual corresponde a alguna de las tres categorías: bueno, regular o malo. Un tramo de carretera bajo supervisión del INVÍAS se evalúa por ambos criterios y por tanto se espera que al confrontar las calificaciones obtenidas con uno y otro guarden coherencia, es decir que si un Administrador Vial califica un tramo como bueno según el Criterio Visual, el Criterio Técnico de este tramo debe apuntar a lo mismo. Para verificar si este comportamiento se da o no, y para representar y analizar la relación de dependencia entre los dos criterios, se realizó un diagrama de dispersión para cada territorial con las calificaciones de cada uno de sus tramos.

La Figura 7 detalla los resultados obtenidos para la territorial Antioquia. En ella se puede ver que los tramos que fueron calificados con el Criterio Visual como buenos tuvieron una calificación comprendida entre 3.2 y 4.9 cuando fueron evaluados bajo el Criterio Técnico, rango que es bastante amplio o disperso

considerando que se esperaría que una vía con calificación técnica menor a 4 visualmente estuviera en condiciones regulares o malas.

Lo anterior refleja la variabilidad que existe en los parámetros tenidos en cuenta por un Administrador Vial al momento de realizar la evaluación visual o la variabilidad de criterio entre un Administrador y otro.

Por otro lado, pavimentos calificados como regular tienen una calificación técnica comprendida entre 2.9 y 4.8, notándose al igual que para la categoría bueno se presenta un rango muy amplio. Estos valores están por fuera del rango que técnicamente se considera regular (3.5 – 4) (ver Tabla 3) y son prácticamente los mismos valores dados a la categoría bueno. Lo mismo sucede con las vías categorizadas como malo, cuyas calificaciones técnicas se encuentran entre los valores 2.2 y 4.3. En general se puede decir que si se escoge aleatoriamente un tramo de vía con calificación bueno, otro con calificación regular y otro con calificación malo, al comparar sus calificaciones técnicas no se aprecia una variación significativa.

Para las territoriales Boyacá, Caquetá, Cauca, Chocó, Cundinamarca, Huila Nariño, Sucre y Tolima se presentan situaciones muy similares a la de la territorial Antioquia, ya que cada categoría del Criterio Visual abarca rangos muy amplios en el Criterio Técnico y valores dados en una categoría se repiten en las otras dos categorías.

Las comparaciones realizadas para las territoriales Bolívar, Casanare, Cesar, Santander y Valle muestran que prácticamente no hay diferencia entre los rangos del Criterio Técnico para cada categoría del Visual, por ejemplo para Cesar tanto las categorías de bueno, regular y malo se encuentran entre el rango de 3 a 5 cuando fueron evaluadas de acuerdo con el Criterio Técnico (Ver Figura 13).

La territorial Cauca (Figura 12) es la única que muestra una diferencia marcada entre un rango y otro de valores del Criterio Técnico para cada categoría del Criterio Visual. Los tramos evaluados por los Administradores Viales como buenos tienen una calificación técnica comprendida entre 4.3 y 4.9, los regulares entre 3.6 y 4.4 y los malos entre 2.9 y 3.4.

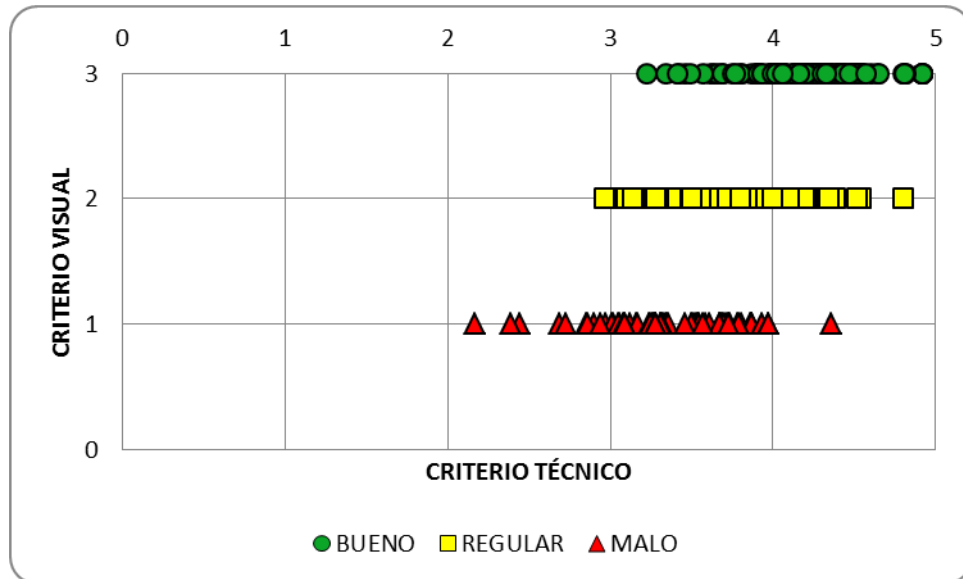


Figura 7. Criterio Visual Vs Criterio Técnico para las vías de la Territorial Antioquia

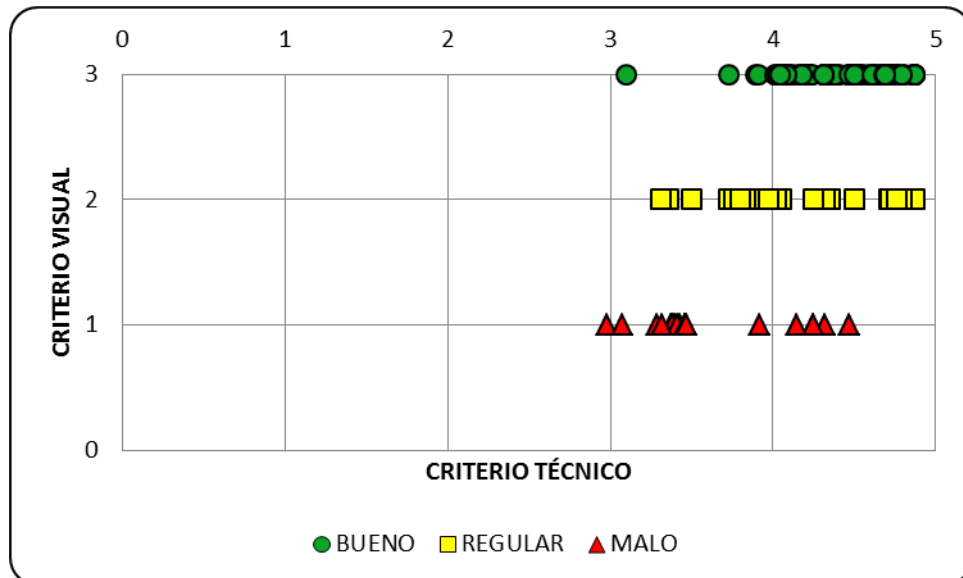


Figura 8. Criterio Visual Vs Criterio Técnico para las vías de la Territorial Bolívar

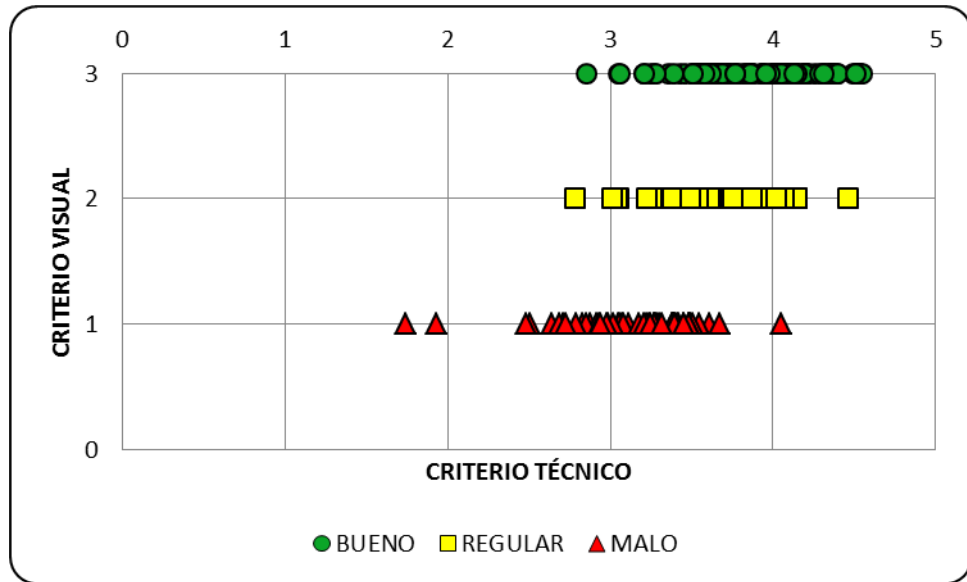


Figura 9. Criterio Visual Vs Criterio Técnico para las vías de la Territorial Boyacá

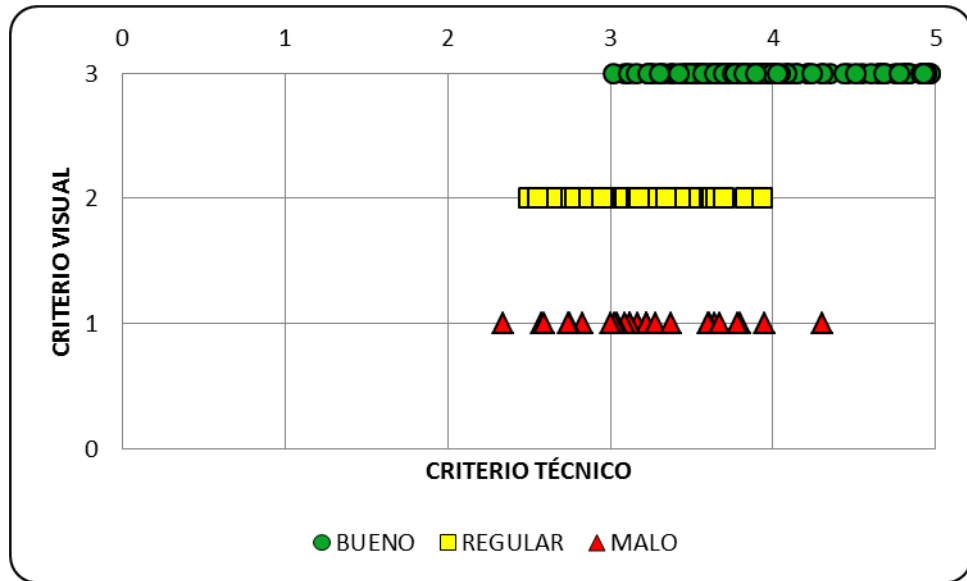


Figura 10. Criterio Visual Vs Criterio Técnico para las vías de la Territorial Caquetá

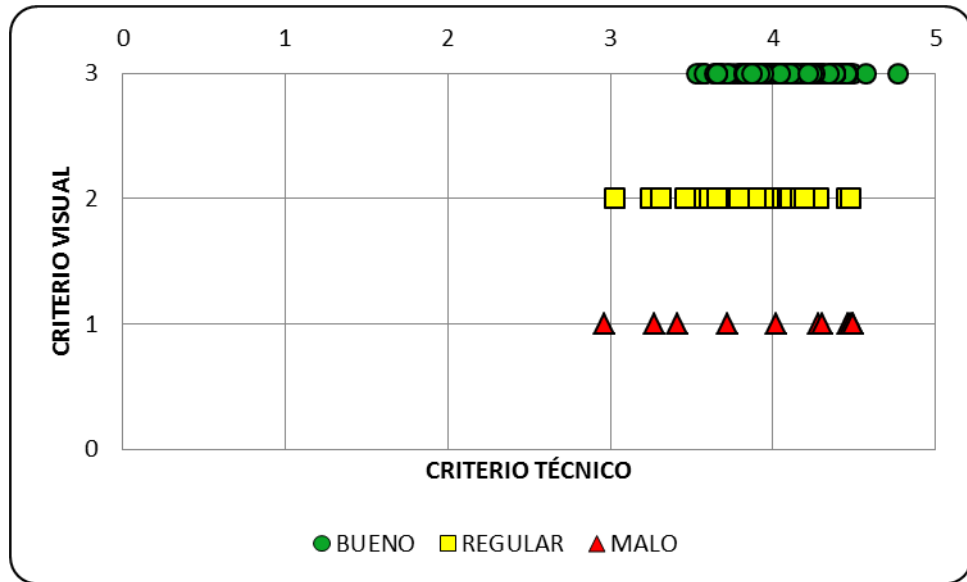


Figura 11. Criterio Visual Vs Criterio Técnico para las vías de la Territorial Casanare

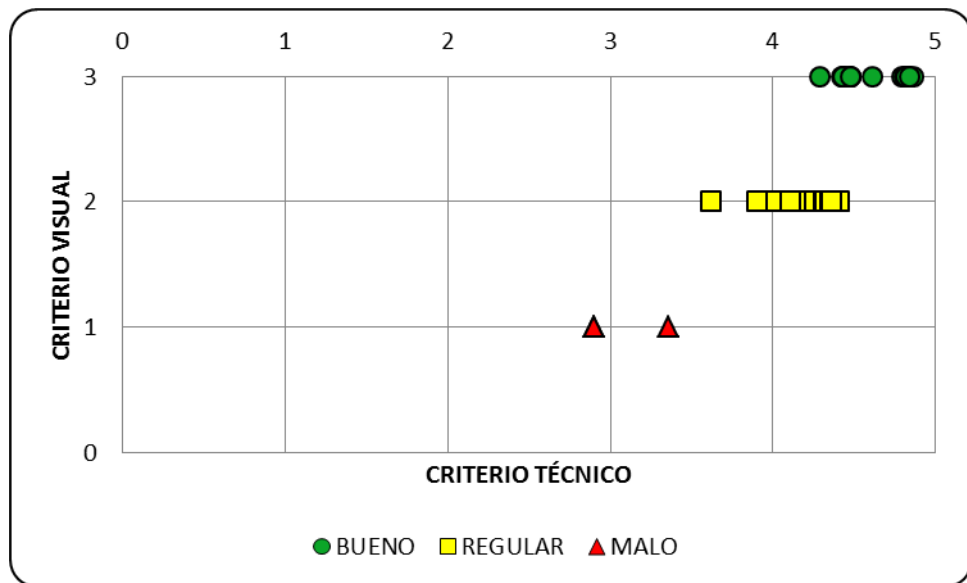


Figura 12. Criterio Visual Vs Criterio Técnico para las vías de la Territorial Cauca



Figura 13. Criterio Visual Vs Criterio Técnico para las vías de la Territorial Cesar

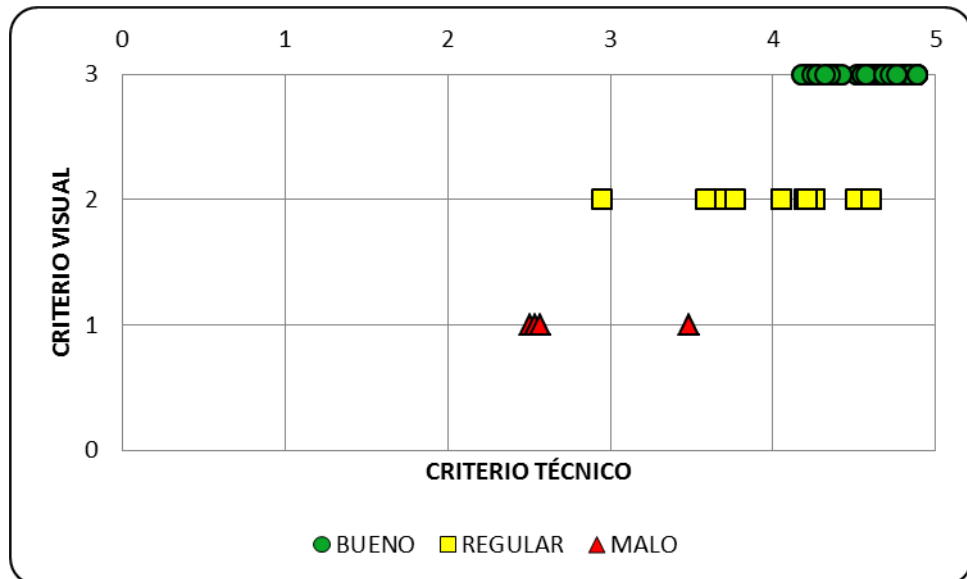


Figura 14. Criterio Visual Vs Criterio Técnico para las vías de la Territorial Chocó

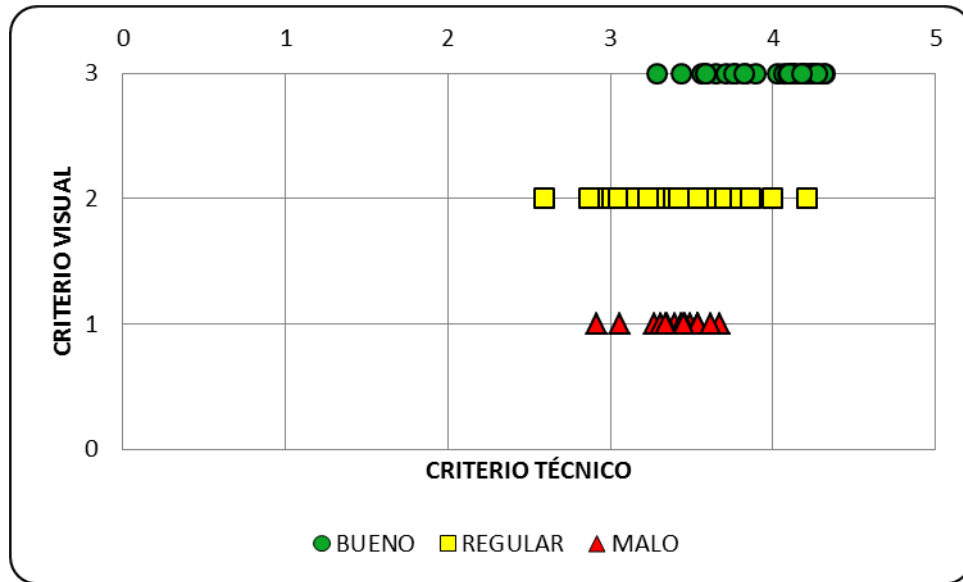


Figura 15. Criterio Visual Vs Criterio Técnico para las vías de la Territorial Cundinamarca

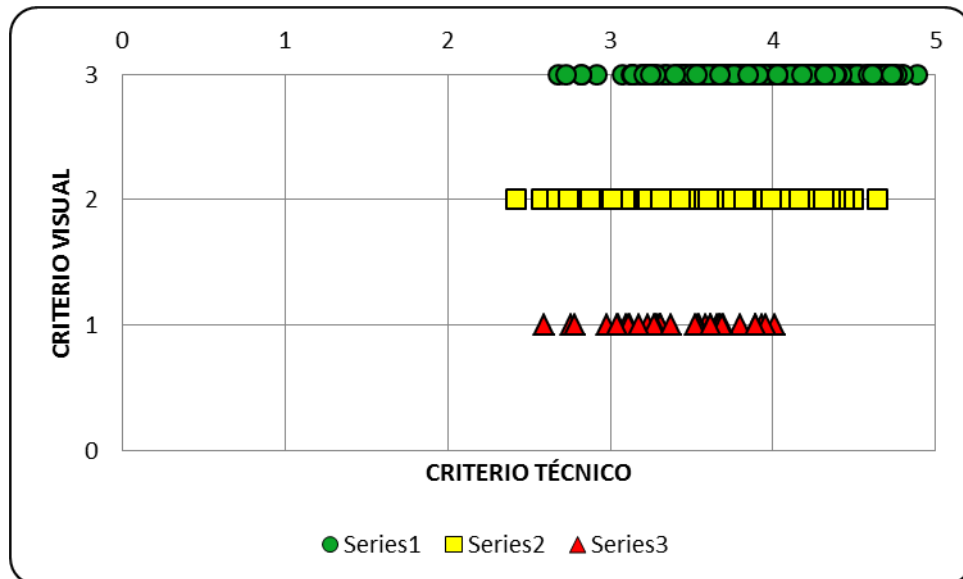


Figura 16. Criterio Visual Vs Criterio Técnico para las vías de la Territorial Huila

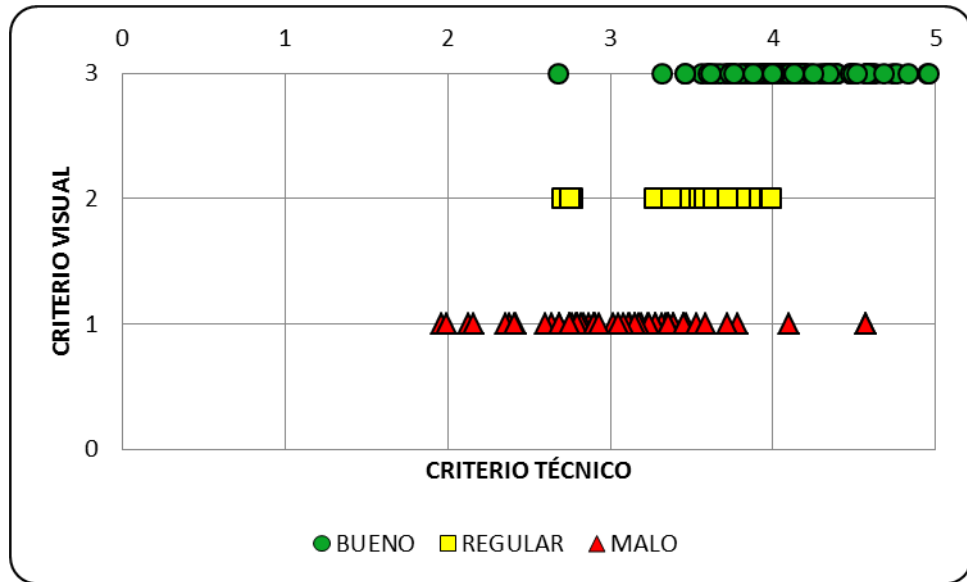


Figura 17. Criterio Visual Vs Criterio Técnico para las vías de la Territorial Nariño

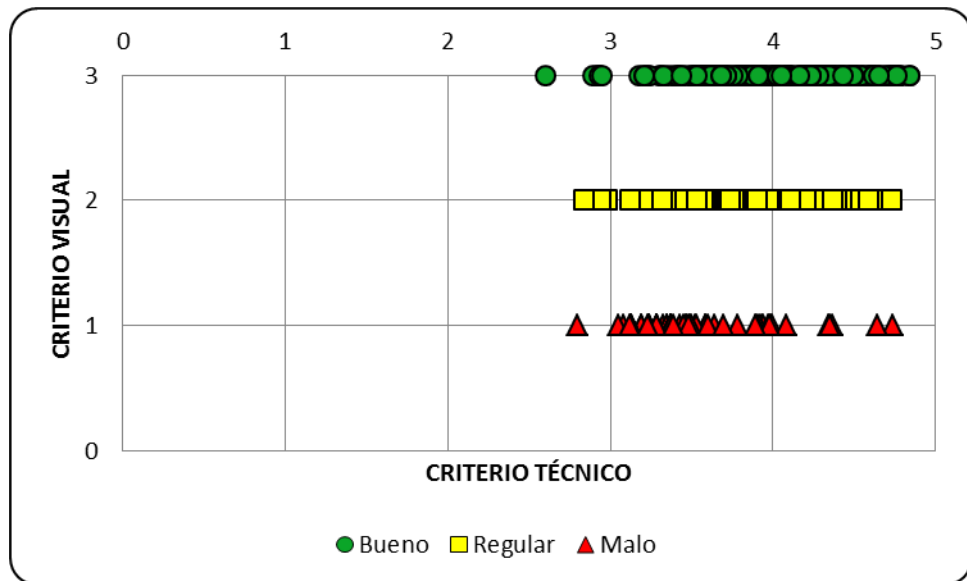


Figura 18. Criterio Visual Vs Criterio Técnico para las vías de la Territorial Santander

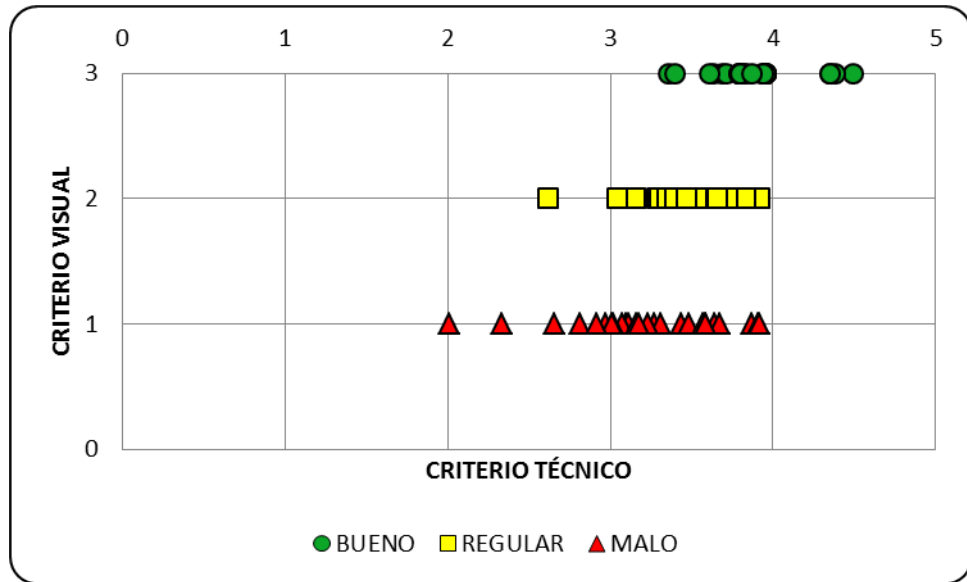


Figura 19. Criterio Visual Vs Criterio Técnico para las vías de la Territorial Sucre

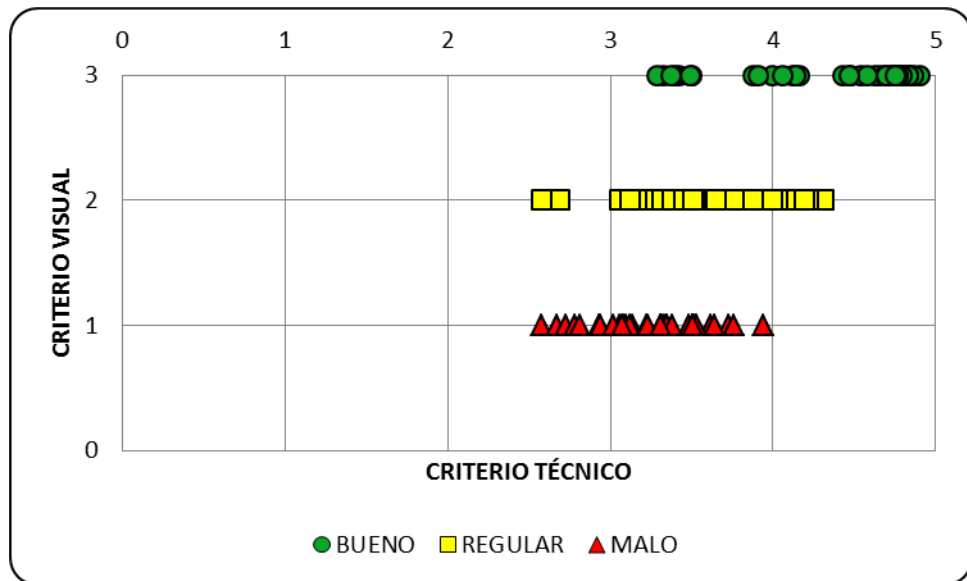


Figura 20. Criterio Visual Vs Criterio Técnico para las vías de la Territorial Tolima

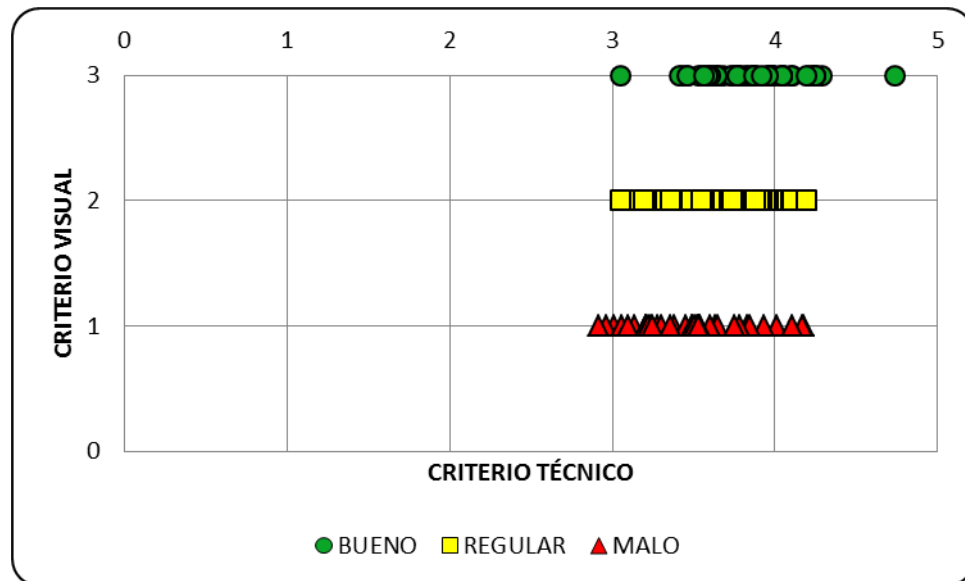


Figura 21. Criterio Visual Vs Criterio Técnico para las vías de la Territorial Valle

Lo reflejado en las figuras anteriores sugiere que las dos metodologías del INVIAS no están alineadas, esto se podría explicar considerando que los parámetros utilizados en el Criterio Técnico no necesariamente le apuntan a evaluar la transitabilidad de la superficie de una vía.

3.3 ANÁLISIS DESCRIPTIVO: DIAGRAMAS DE CAJAS

A continuación se presentan diagramas de caja o “box-plots” que también explican gráficamente el comportamiento de la variable Criterio Técnico para las distintas categorías del Criterio Visual. Estos diagramas son una presentación visual que describen al mismo tiempo varias características importantes del conjunto de datos, tales como el centro, la dispersión, la simetría o asimetría, la identificación de observaciones atípicas, los tres cuartiles, y los valores mínimo y máximo de los datos sobre un rectángulo (caja), alineado verticalmente.

Para efectos de hacer más sencillos y explícitos los diagramas se ha asignado el valor de uno (1) a la categoría malo del Criterio Visual, dos (2) a la categoría regular y tres (3) a la categoría de bueno, y se han visualizado las marcas de solapamiento que muestran si las medianas son o no significativamente distintas.

En general se puede observar que las marcas no se solapan y que, por tanto, las medianas en cada grupo son significativamente distintas (Ver Figura 22 a Figura 36). Esto nos indica, en particular, que las categorías del Criterio Visual son diferentes, sin embargo se hace necesario utilizar un método estadístico para establecer la significación de las diferencias observadas.

A continuación se presenta un análisis detallado de los datos por cada territorial:

- **Antioquia (Figura 22):** La categoría malo es la que presenta mayor dispersión de los datos y menor mediana como es de esperarse, seguida de la categoría regular y luego de la categoría bueno. Las tres categorías presentan distribución de los datos simétrica y valores atípicos.
- **Bolívar (Figura 23):** La categoría regular es la que presenta mayor dispersión de los datos, tiene una distribución con sesgo hacia arriba o positiva y no presenta valores atípicos; la categoría bueno presenta una distribución casi simétrica y solo un valor atípico, mientras que la categoría malo presenta poca dispersión en el 50% de los datos centrales, una distribución asimétrica hacia arriba o positiva y bastantes datos atípicos. Los valores promedio de las distintas categorías indican que un tramo bueno es el que mayor calificación tiene, seguido de uno regular y por ultimo de uno malo.
- **Boyacá (Figura 24):** La categoría malo es la que presenta mayor dispersión de los datos, tiene una distribución con sesgo hacia abajo o negativo y presenta dos valores atípicos; la categoría regular presenta una distribución casi simétrica y también dos valores atípicos, mientras que la categoría bueno presenta una distribución asimétrica hacia abajo o negativa y un dato atípico. Los valores promedio de las distintas categorías indican que un tramo bueno es el que mayor calificación tiene, seguido de uno regular y por ultimo de uno malo.
- **Caquetá (Figura 25):** Tanto la categoría bueno como la malo presentan mayor dispersión de los datos, tienen una distribución un poco sesgada hacia arriba o positiva y no presentan valores atípicos; la categoría regular presenta una distribución simétrica y tampoco presenta valores atípicos. Los valores promedio de las distintas categorías indican que un tramo bueno tiene casi la misma calificación técnica que uno regular.
- **Casanare (Figura 26):** La categoría malo es la que presenta mayor dispersión de los datos, sin embargo el 25% superior no tiene variabilidad; esta categoría tiene una distribución con sesgo hacia abajo o negativo y no presenta valores atípicos; la categoría bueno presenta una distribución simétrica y no tiene valores atípicos, mientras que la categoría regular presenta poca dispersión en el 50% de los datos centrales, una distribución simétrica y bastantes datos atípicos. Los valores promedio de las distintas categorías indican que un tramo malo es el que mayor calificación tiene, seguido de uno bueno y por ultimo de uno regular.
- **Cauca (Figura 27):** en general las tres categorías presentan poca dispersión de los datos, la categoría bueno tiene distribución un poco sesgada hacia abajo o negativa, y la categoría regular y malo tienen una distribución sesgada hacia arriba o positiva; no se presentan valores atípicos. Los valores promedio de las distintas categorías indican que un

tramo bueno es el que mayor calificación tiene, seguido de uno regular y por ultimo de uno malo.

- **César (Figura 28):** Las tres categorías presentan distribución casi simétrica y datos atípicos. Los valores promedio indican que un tramo bueno es el que mayor calificación tiene, seguido de uno regular y por ultimo de uno malo.
- **Chocó (Figura 29):** Los valores promedio indican que un tramo bueno es el que mayor calificación tiene, seguido de uno regular y por ultimo de uno malo.
- **Cundinamarca (Figura 30):** La categoría regular es la que presenta mayor dispersión de los datos, tiene una distribución con sesgo hacia arriba o positivo y presenta un valor atípico; la categoría bueno presenta una distribución sesgada hacia abajo o negativa sin valores atípicos, mientras que la categoría malo presenta poca dispersión en el 50% de los datos centrales, una distribución asimétrica hacia abajo o negativa y un dato atípico. Los valores promedio de las distintas categorías indican que un tramo bueno es el que mayor calificación tiene, seguido de uno malo y por ultimo de uno regular.
- **Huila (Figura 31):** Los valores promedio indican que un tramo bueno es el que mayor calificación tiene, seguido de uno regular y por ultimo de uno malo.
- **Nariño (Figura 32):** Tanto la categoría bueno como la malo presentan mayor dispersión de los datos, tienen una distribución de los datos simétrica y presentan algunos valores atípicos; la categoría regular presenta una distribución asimétrica sesgada hacia abajo o negativa. Los valores promedio de las distintas categorías indican que un tramo bueno tiene casi la misma calificación técnica que uno regular.
- **Santander (Figura 33):** Las tres categorías presentan una alta dispersión de los datos y simetría en la distribución. Los valores promedio de las distintas categorías indican que un tramo bueno tiene casi la misma calificación técnica que uno regular.
- **Sucre (Figura 34):** Las tres categorías presentan simetría en la distribución. Los valores promedio de las distintas categorías indican que un tramo bueno tiene casi la misma calificación técnica que uno regular.
- **Tolima (Figura 35):** Las tres categorías presentan una alta dispersión de los datos, la categoría malo y bueno presentan un sesgo hacia abajo o negativo y la categoría regular presenta una distribución casi simétrica y valores atípicos. Las tres categorías presentan simetría en la distribución. Los valores promedio de las distintas categorías indican que un tramo bueno tiene casi la misma calificación técnica que uno regular.
- **Valle (Figura 36):** Las tres categorías presentan una alta dispersión de los datos y simetría en la distribución. Los valores promedio de las distintas categorías indican que un tramo bueno tiene casi la misma calificación técnica que uno regular.

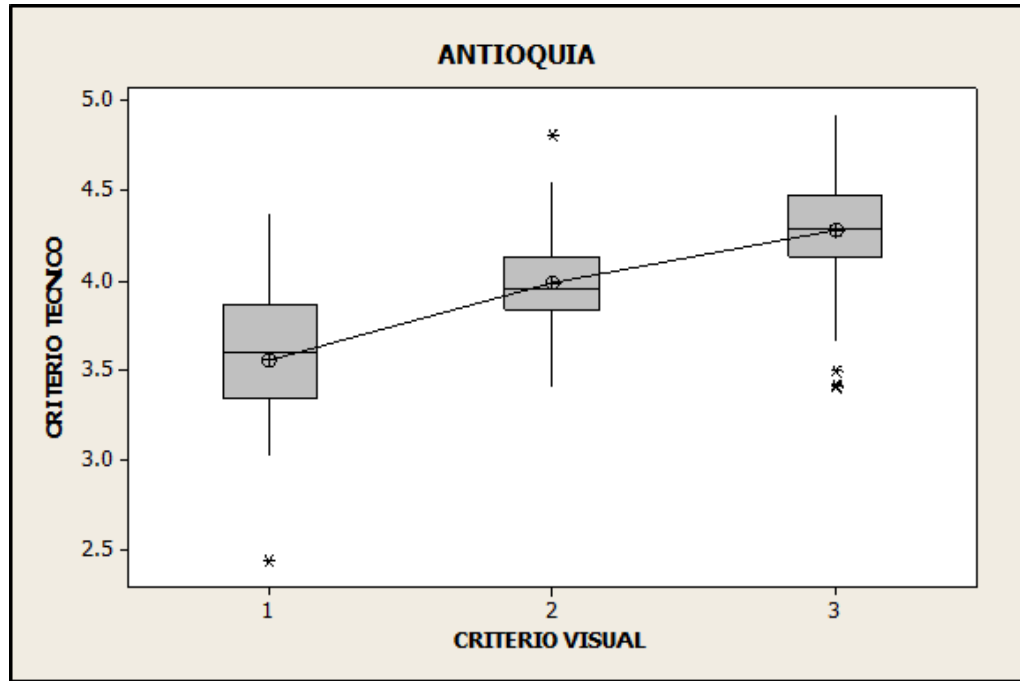


Figura 22. Diagrama de cajas territorial Antioquia

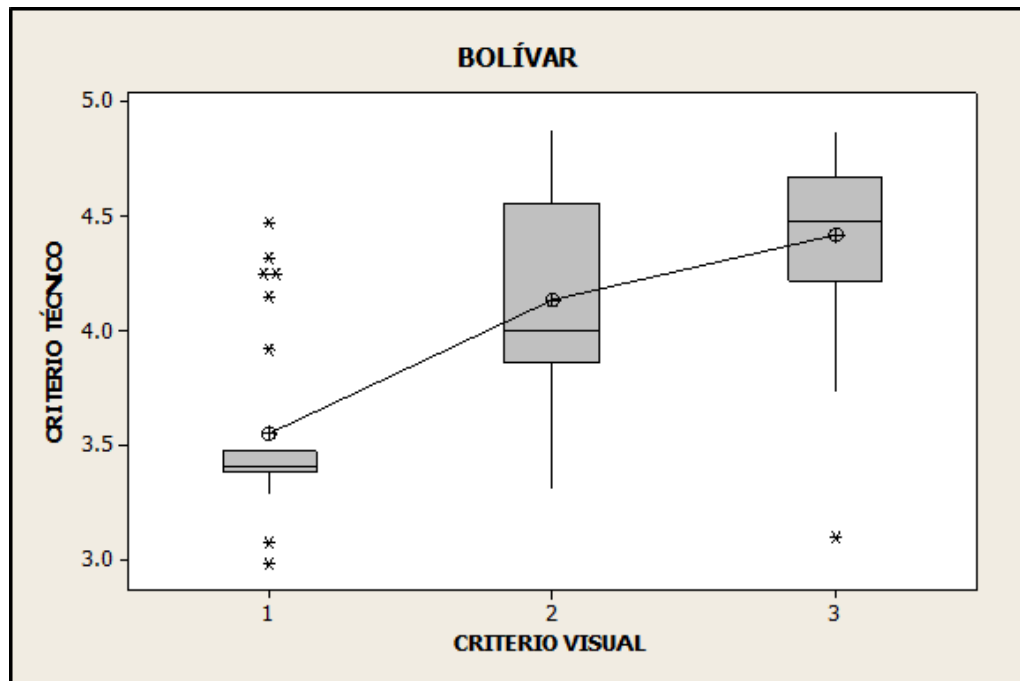


Figura 23. Diagrama de cajas territorial Bolívar

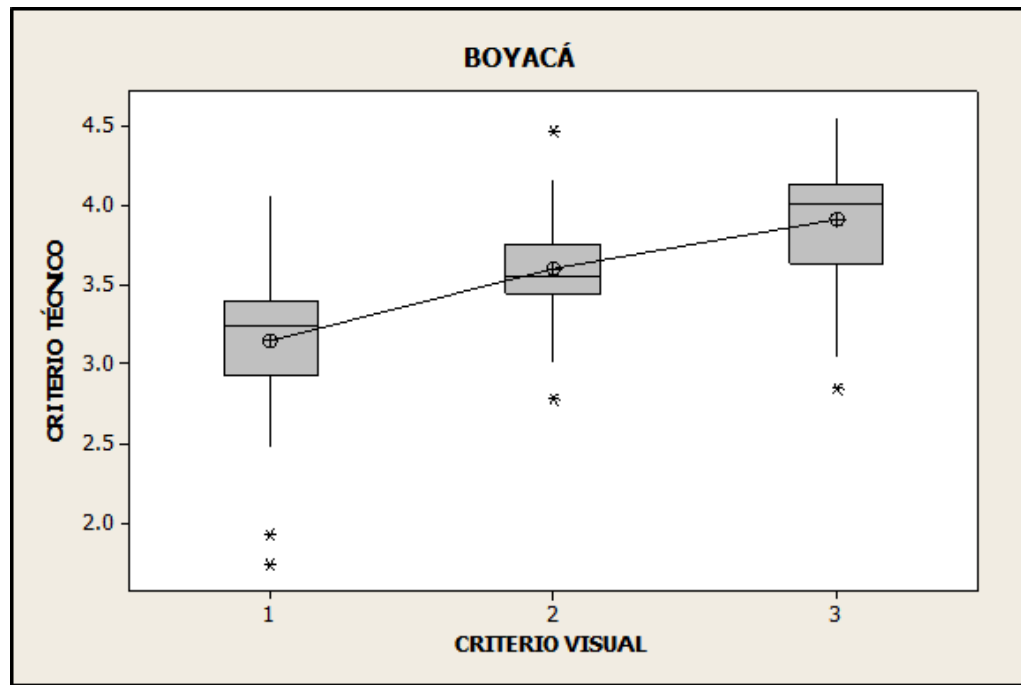


Figura 24. Diagrama de cajas territorial Boyacá

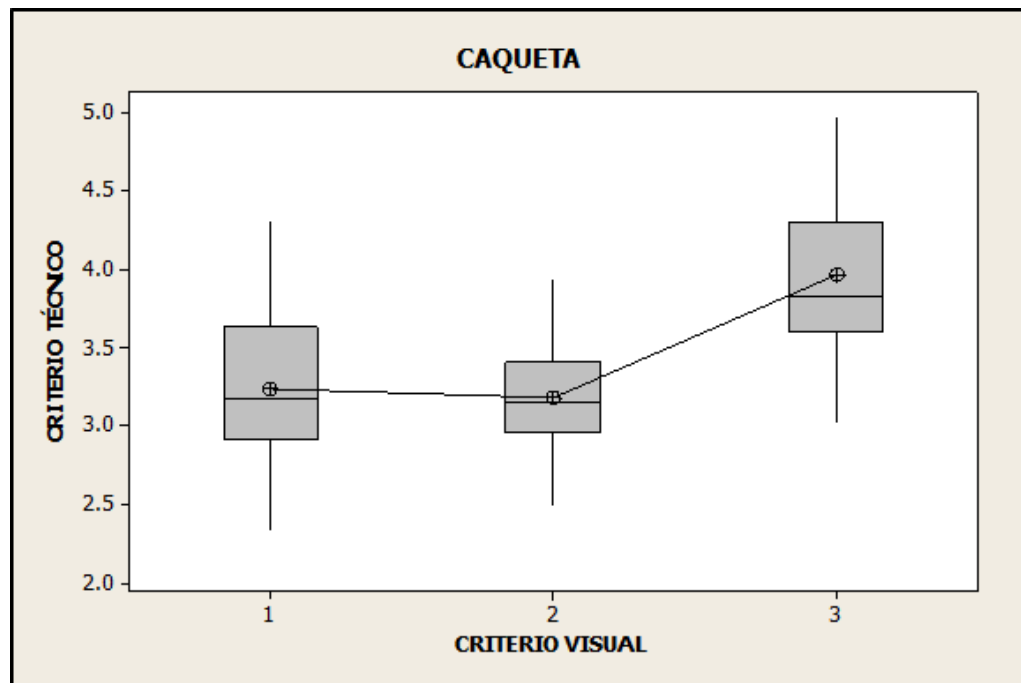


Figura 25. Diagrama de cajas territorial Caquetá

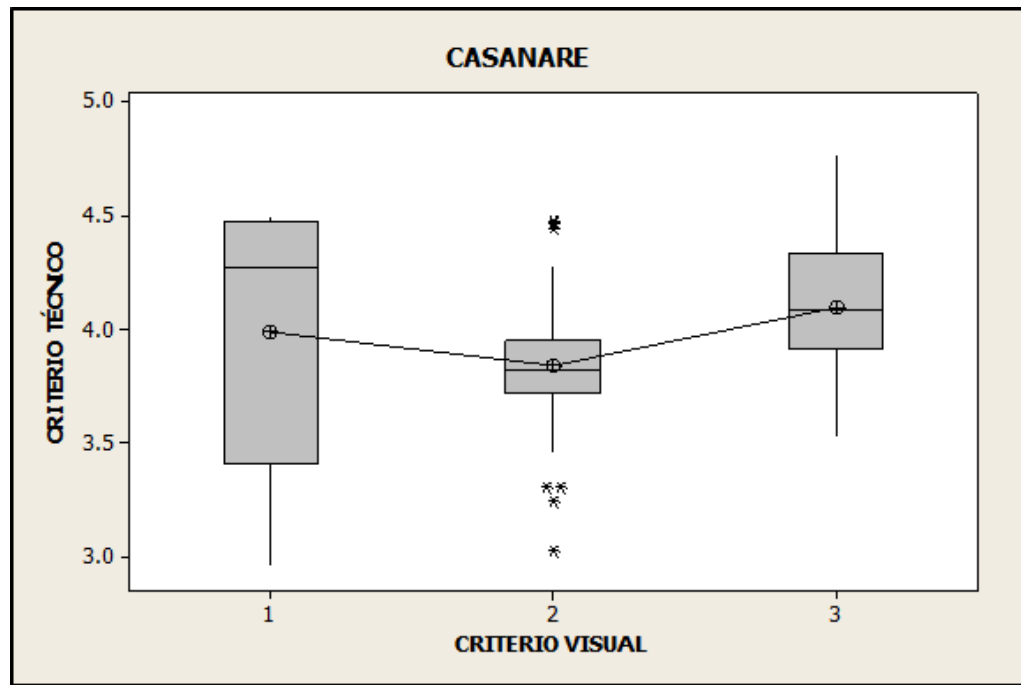


Figura 26. Diagrama de cajas territorial Casanare

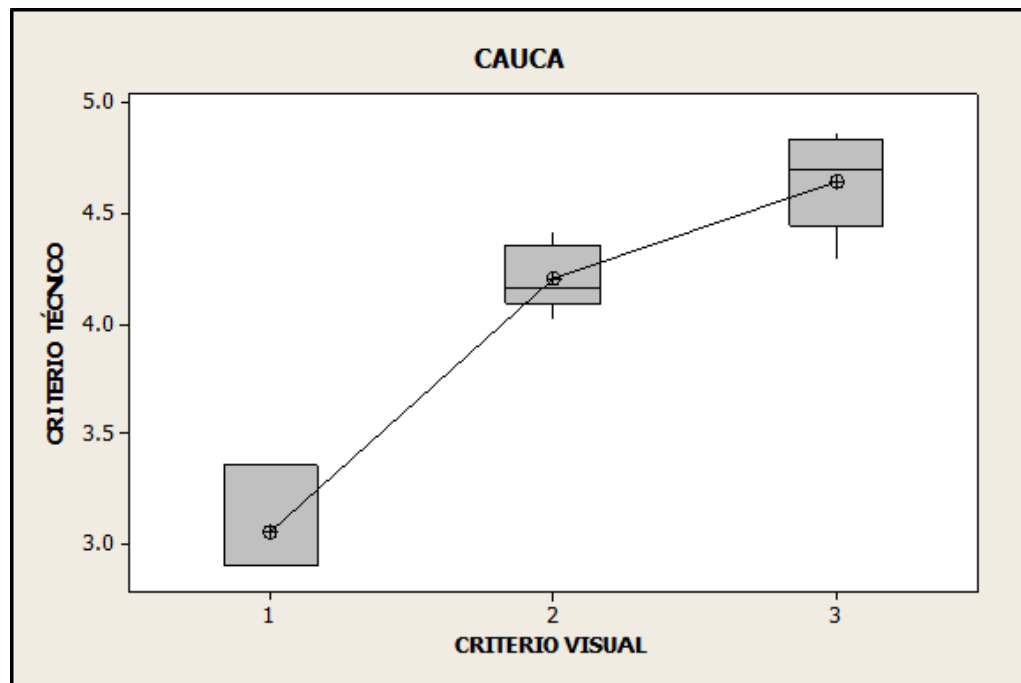


Figura 27. Diagrama de cajas territorial Cauca

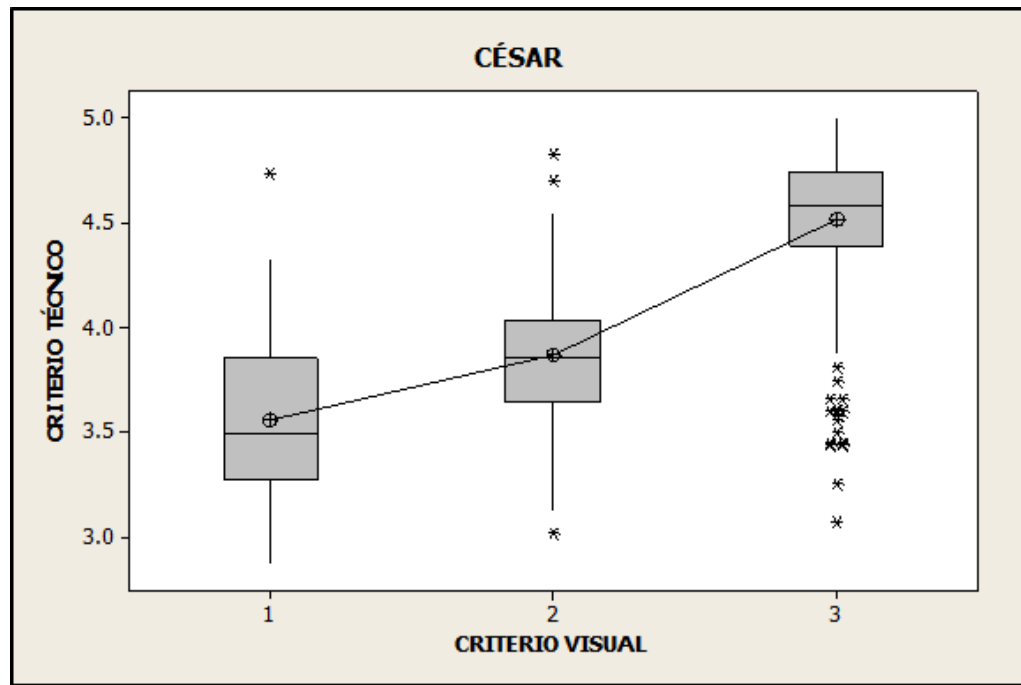


Figura 28. Diagrama de cajas territorial César

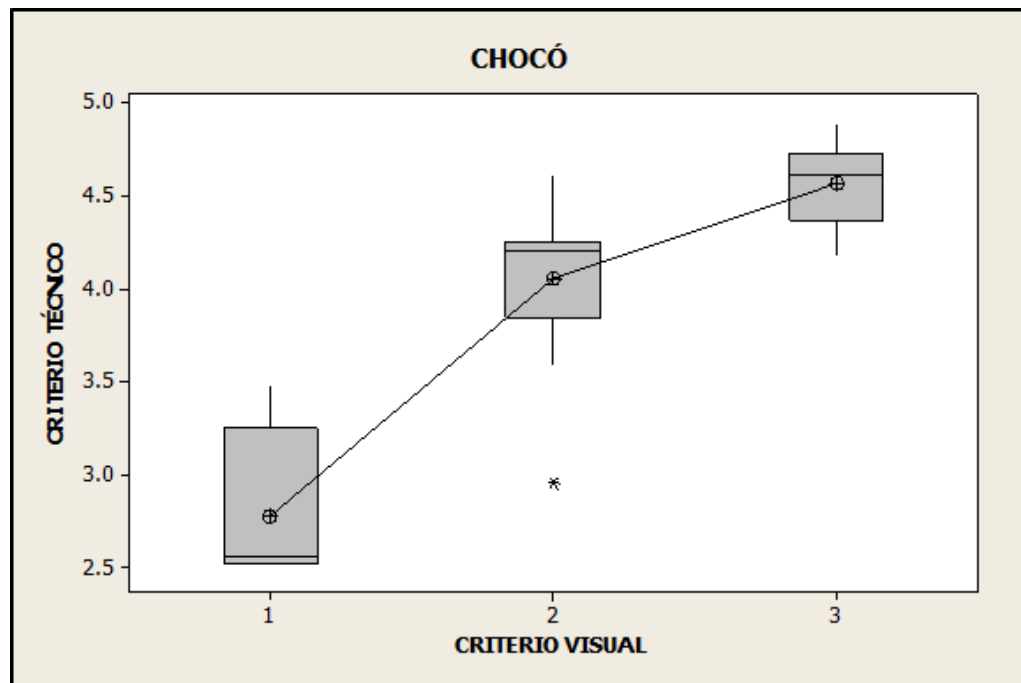


Figura 29. Diagrama de cajas territorial Chocó

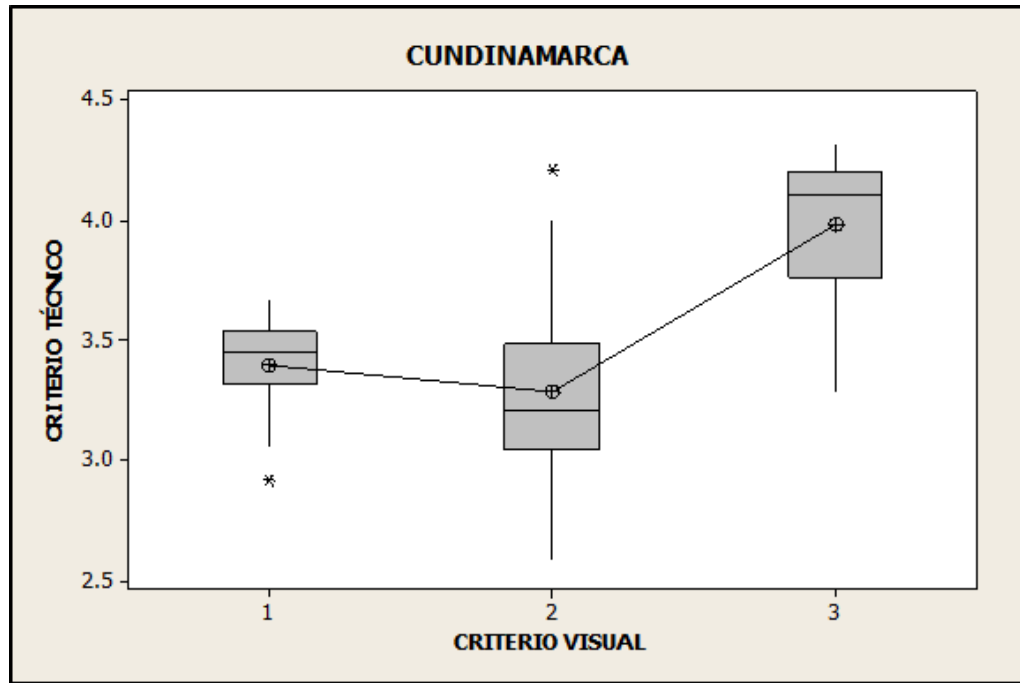


Figura 30. Diagrama de cajas territorial Cundinamarca

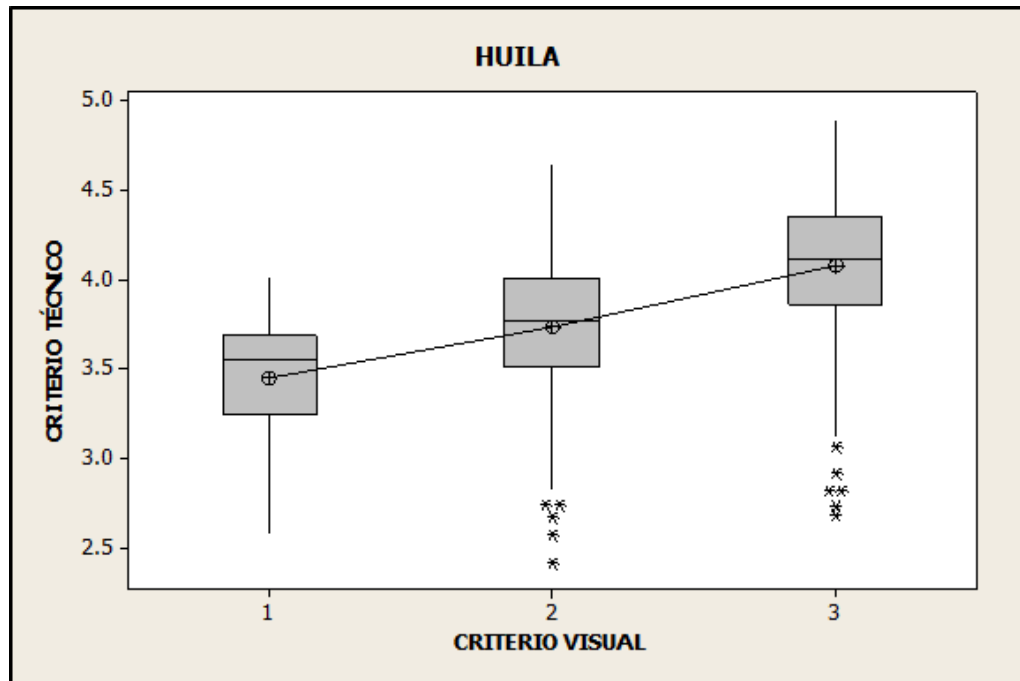


Figura 31. Diagrama de cajas territorial Huila

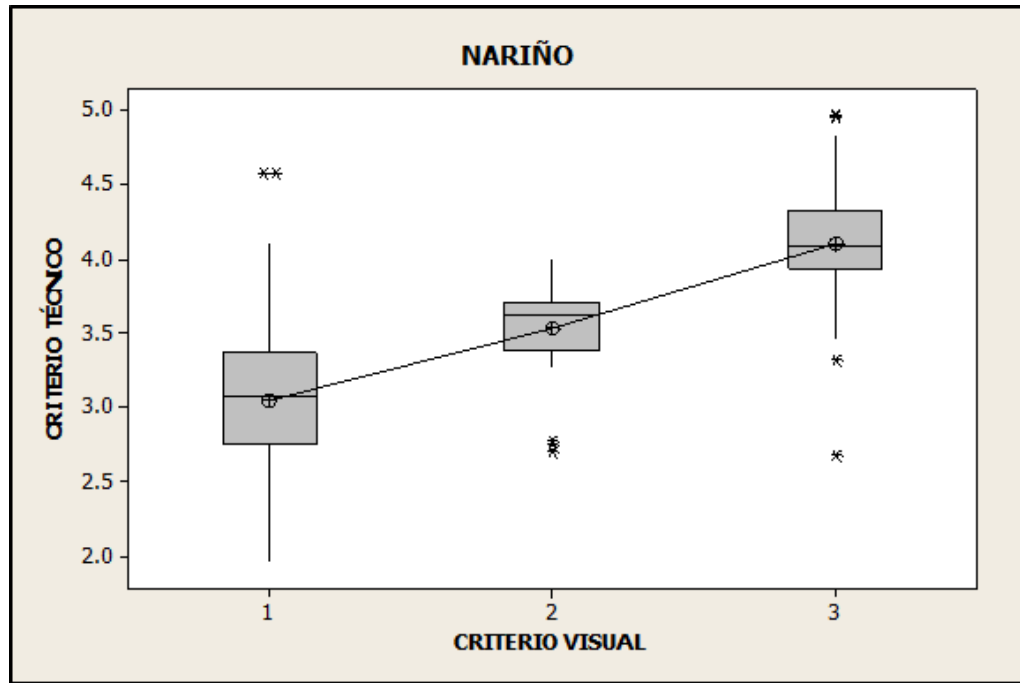


Figura 32. Diagrama de cajas territorial Nariño

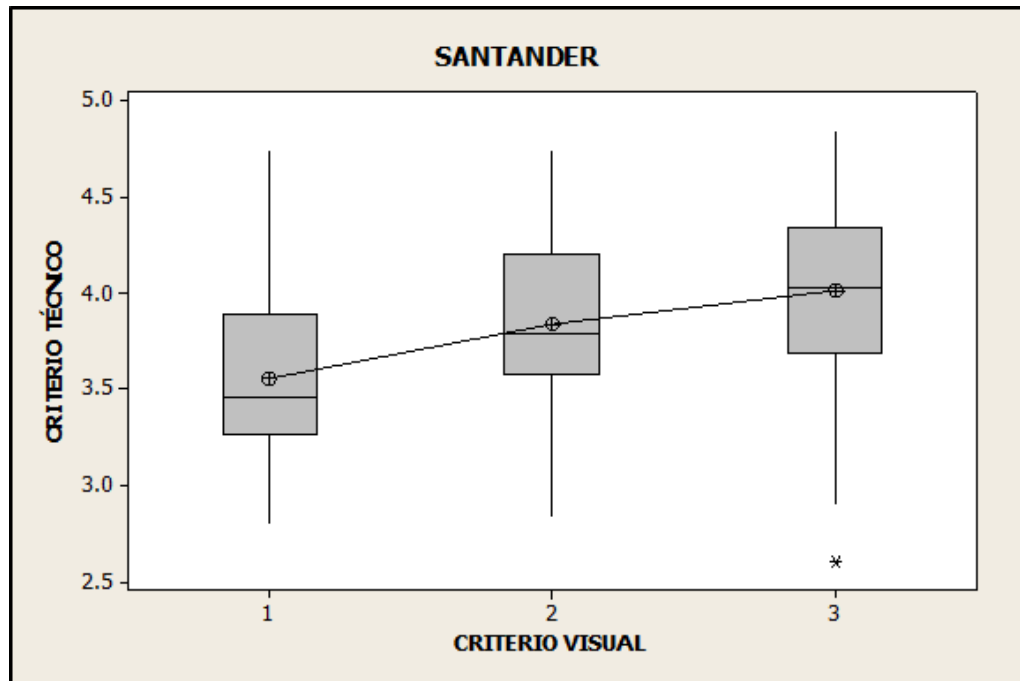


Figura 33. Diagrama de cajas territorial Santander

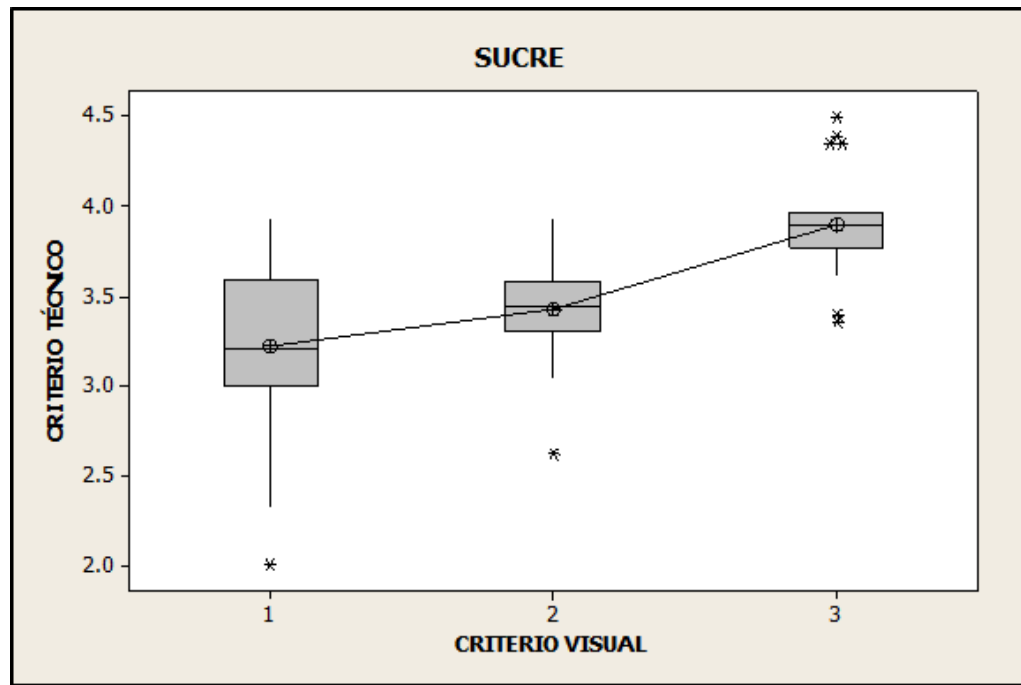


Figura 34. Diagrama de cajas territorial Sucre

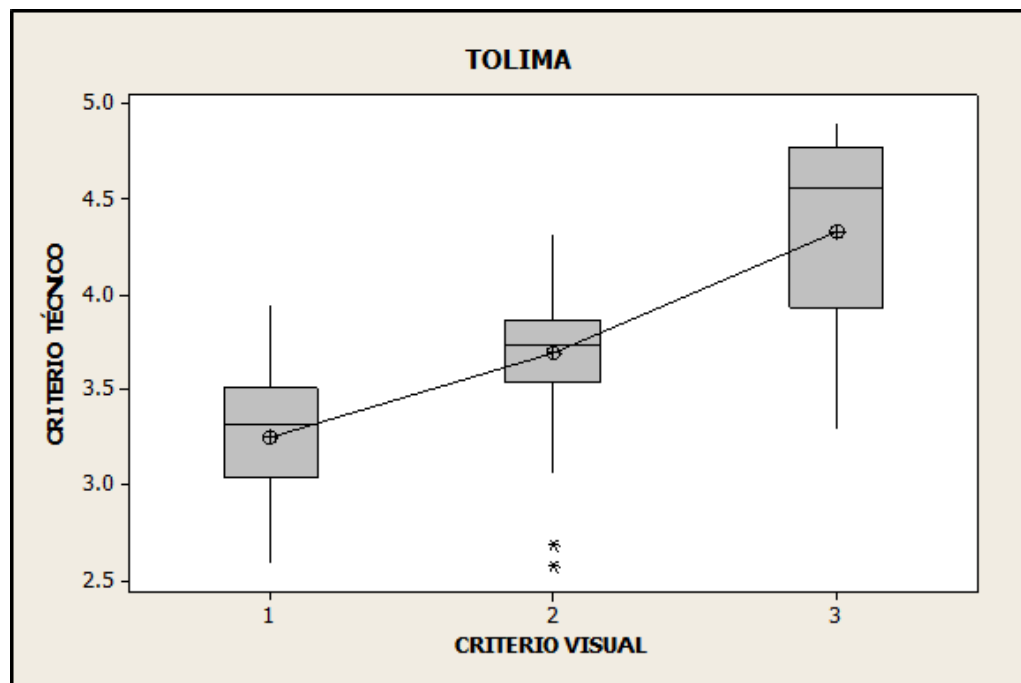


Figura 35. Diagrama de cajas territorial Tolima

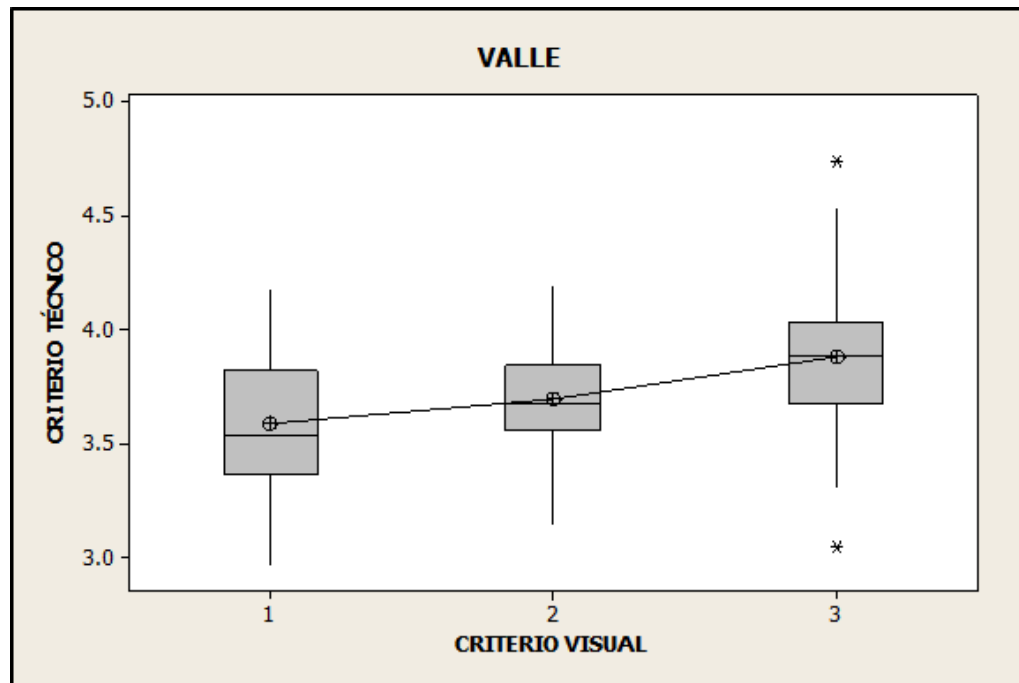


Figura 36. Diagrama de cajas territorial Valle

3.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos de los diagramas de dispersión de los criterios implementados por el INVIAS y de los diagramas de caja, y tratando de determinar si la variable Criterio Visual (variable categórica) y la variable Criterio Técnico (variable continua) son independientes o no, o si existe relación estadística entre ellas, se desarrolló un análisis de varianza también conocida como Prueba ANOVA.

Al aplicar ANOVA se puede conocer el modo en que el valor medio de la Variable Criterio Técnico es afectada por los diferentes niveles de clasificaciones de lo variable Criterio Visual; para ello se contrasta la hipótesis de si diferentes muestras de valores de la variable Criterio Técnico (variable dependiente), asociadas a cada uno de los niveles de la variable Criterio Visual (variable independiente), presentan una media poblacional constante (hipótesis nula) o si por el contrario presentan medias diferentes (hipótesis alternativa) para cada uno de los niveles.

El factor o variable categórica, en este caso tiene tres valores posibles o niveles (bueno, regular y malo), entonces la hipótesis que se contrasta se representa como se muestra en la Ecuación (2) y la Ecuación (3):

$$H_0: \mu_{\text{criteriotécnicobueno}} = \mu_{\text{criteriotécnicoregular}} = \mu_{\text{criteriotécnicomalo}} \quad (2)$$

$$H_1: \text{alguna } \mu_i \text{ es diferente} \quad (3)$$

Donde μ_i representa la media correspondiente a cada nivel del factor (bueno, regular y malo).

Para llevar a cabo esta prueba de hipótesis de igualdad de medias se obtuvo un estadístico F que refleja el grado de similitud existente entre las medias que se están comparando. Asociado a cada valor del estadístico F, se encuentra un P-valor que representa la probabilidad de rechazar o no la hipótesis nula (Ecuación (1)). Para un nivel de confianza del 95%, el P-valor debe ser menor a 0.05 para rechazar la hipótesis nula y concluir que diferentes muestras de valores de la variable Criterio Técnico, asociadas a cada uno de los niveles de la variable Criterio Visual, presentan una media poblacional diferente y por tanto existe una diferencia significativa entre ellas.

A continuación se muestran los resultados obtenidos del ANOVA para cada una de las territoriales.

Tabla 5. Tabla ANOVA para la territorial Antioquia

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Criterio Visual	2	9.9688	4.9844	53.65	0.000
Error	186	17.2798	0.0929		
Total	188	27.2486			

Tabla 6. Tabla ANOVA para la territorial Bolívar

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Criterio Visual	2	16.689	8.345	71.18	0.000
Error	153	17.938	0.117		
Total	155	34.628			

Tabla 7. Tabla ANOVA para la territorial Boyacá

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Criterio Visual	2	25.181	12.59	120.88	0.000
Error	331	34.477	0.104		
Total	333	59.658			

Tabla 8. Tabla ANOVA para la territorial Caquetá

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Criterio Visual	2	31.178	15.589 7	7.45	0.000
Error	205	41.262	0.201		
Total	207	72.44			

Tabla 9. Tabla ANOVA para la territorial Casanare

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Criterio Visual	2	3.7122	1.8561	25.13	0.000
Error	245	18.0948	0.0739		
Total	247	21.807			

Tabla 10. Tabla ANOVA para la territorial Cauca

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Criterio Visual	2	7.0755	3.5378	98.88	0.000
Error	32	1.1449	0.0358		
Total	34	8.2205			

Tabla 11. Tabla ANOVA para la territorial Cesar

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Criterio Visual	2	46.084	23.042	200.49	0.000
Error	368	42.294	0.115		
Total	370	88.378			

Tabla 12. Tabla ANOVA para la territorial Chocó

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Criterio Visual	2	14.709	7.354	110.02	0.000
Error	106	7.086	0.067		
Total	108	21.7949			

Tabla 13. Tabla ANOVA para la territorial Cundinamarca

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Criterio Visual	2	9.6408	4.8204	57.41	0.000
Error	91	7.6411	0.084		
Total	93	17.2819			

Tabla 14. Tabla ANOVA para la territorial Guajira

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Criterio Visual	2	1.0383	0.5192	7.85	0.001
Error	87	5.7547	0.0661		
Total	89	6.793			

Tabla 15. Tabla ANOVA para la territorial Huila

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Criterio Visual	2	24.546	12.273	80.56	0.000
Error	686	104.51	0.152		
Total	688	129.06			

Tabla 16. Tabla ANOVA para la territorial Nariño

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Criterio Visual	2	41.004	20.502	122.43	0.000
Error	189	31.649	0.167		
Total	191	72.652			

Tabla 17. Tabla ANOVA para la territorial Santander

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Criterio Visual	2	10.023	5.012	27.03	0.000
Error	362	67.107	0.185		
Total	364	77.13			

Tabla 18. Tabla ANOVA para la territorial Sucre

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Criterio Visual	2	6.095	3.047	24.29	0.000
Error	70	8.782	0.125		
Total	72	14.877			

Tabla 19. Tabla ANOVA para la territorial Tolima

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Criterio Visual	2	20.35	10.175	69.82	0.000
Error	144	20.984	0.146		
Total	146	41.334			

Tabla 20. Tabla ANOVA para la territorial Valle

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Criterio Visual	2	3.0272	1.5136	24.87	0.000
Error	246	14.9723	0.0609		
Total	248	17.9995			

Debido a que en todos los casos el P-valor obtenido es inferior al nivel de significancia estipulado del 5%, se demostró por medio de la prueba de varianzas ANOVA que para todas las territoriales existe una clara relación entre el Criterio Técnico y el Criterio Visual aun cuando el Criterio Técnico contempla parámetros que no están relacionados con las características superficiales del pavimento. Estos resultados soportan y argumentan el desarrollo de modelos de Serviabilidad a partir de la correlación de los dos criterios.

3.5 DESARROLLO DE MODELOS DE REGRESIÓN LINEAL

Tomando como base los resultados presentados en la sección anterior que demuestran que estadísticamente existe una relación directa entre los dos criterios de evaluación del INVÍAS, se procedió a estimar un modelo lineal para cada territorial que explicara el comportamiento del Criterio Visual (variable dependiente) en función de los diferentes parámetros que evalúa el Criterio Técnico (variables independientes). Para ello se aplicó un modelo de regresión lineal múltiple, el cual permitió determinar los coeficientes de la ecuación lineal o influencia que tiene cada uno de los parámetros en la percepción de la transitabilidad y confort que ofrecen las vías. Para poder introducir la variable Criterio Visual en los modelos, se le dio un tratamiento de variable categórica, asignándole el valor de uno (1) a malo, dos (2) a regular y tres (3) a bueno.

Teniendo en cuenta que varios de los parámetros que se evalúan en el Criterio Técnico no están directamente relacionados con el estado superficial del pavimento, como lo son el estado de las bermas, de los drenajes (cunetas y alcantarillas), de las zonas laterales y de la señalización, y que una buena propiedad de un modelo de regresión lineal es que permita explicar el

comportamiento de la variable respuesta lo mejor posible, haciendo uso del menor número de variables predictoras posibles (principio de parsimonia), se procedió a realizar modelos solo con aquellos parámetros o variables que hacen referencia a daños superficiales del pavimento; estas fueron: baches, fisuras, deformaciones, desprendimientos, ahuellamiento y otros daños. Las unidades en que se encuentran los datos de cada una de las variables que se utilizaron para estimar este tipo de modelos fueron:

Tabla 21. Unidades de los datos de las variables utilizadas en los modelos de regresión lineal

Parámetro	Baches	Fisuras	Deformaciones	Desprendimientos	Ahuellamiento	Otros Daños
Unidad	Densidad	Densidad	Densidad	Densidad	mm	Densidad

Al ajustar los modelos de regresión lineal con la ayuda del Software Estadístico Minitab, en los resultados se aprecia que varias de las variables a pesar de corresponder a daños que influyen directamente en el estado del pavimento no son significativas para predecir la transitabilidad de la vía y que por lo tanto no son buenas predictoras de la variable Criterio Visual. Como ya se dijo, lo que se buscaba era tener el menor número de variables independientes y para lograr este objetivo, se procedió a usar un método “Stepwise” conocido como eliminación hacia atrás o “Backward Elimination”. Este método consiste en eliminar paso a paso aquellas variables que no sean significativas, es decir, con P-value mayor a 0.05.

3.6 DESARROLLO DE MODELOS LOGIT ORDINAL Y PROBIT ORDINAL

Los modelos de probabilidad ordenados (logit y probit) se derivan de la definición de una variable no observada z que es utilizada para modelar una serie de datos que tienen una escala ordinal, como es el caso de la variable Criterio Visual, la cual tiene tres categorías ordenadas, uno (malo), dos (regular) y tres (bueno). Esta variable no observada suele ser especificada como una función lineal dependiente de un conjunto de variables explicativas (X_i), tal como se muestra en la Ecuación (4).

$$z = f(\beta_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_i X_i) + \varepsilon \tag{4}$$

En este caso, el conjunto de coeficientes (β_i) es estimado utilizando el procedimiento de máxima verosimilitud. A su vez, ε es un término de error aleatorio cuya especificación define el tipo de modelo, por ejemplo si el error distribuye Normal se está en presencia del modelo probit ordinal; entretanto, si sigue la distribución logística se tiene el modelo logit ordinal. La función z frecuentemente se expresa lineal en los parámetros como sigue:

$$z = \beta X + \varepsilon \tag{5}$$

Usando la Ecuación (4), los datos ordinales observados, y , son definidos como lo indica la Ecuación (5):

$$\begin{aligned}
 y &= 1 \text{ si } z \leq \tau_0 \\
 y &= 2 \text{ si } \tau_0 < z \leq \tau_1 \\
 y &= 3 \text{ si } \tau_1 < z \leq \tau_2 \\
 y &= \dots \\
 y &= I \text{ si } z \geq \tau_{I-1}
 \end{aligned} \tag{6}$$

Donde τ son parámetros estimables o umbrales. I representa el número de categorías de la variable dependiente que se desea explicar. Nótese que se debe estimar $I - 1$ umbrales que representan los valores extremos que definen los límites cada una de estas categorías.

Los τ son parámetros que son estimados en el modelo conjuntamente con los β . El problema de la estimación se convierte entonces en determinar la probabilidad de una categoría I específica para cada observación n . Esta determinación es lograda con la Ecuación (7) al hacer una suposición en la distribución de ε .

$$\begin{aligned}
 P(y = 1) &= F(\tau_0 - \beta X) \\
 P(y = 2) &= F(\tau_1 - \beta X) - F(\tau_0 - \beta X) \\
 &\dots \\
 P(y = i) &= F(\tau_i - \beta X) - F(\tau_{i-1} - \beta X) \\
 P(y = I) &= 1 - F(\tau_{I-1} - \beta X)
 \end{aligned} \tag{7}$$

Donde F es la función de distribución acumulada. Para los modelos logit, F es la función de densidad de probabilidad logística que se muestra en la Ecuación (8):

$$F(z) = \frac{\exp(z)}{1 + \exp(z)} \tag{8}$$

Para los modelos probit, F es la función de distribución acumulativa de una normal estandarizada que se muestra en la Ecuación (9):

$$F(z) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp(-t^2/2) dt \tag{9}$$

Donde la variable t es una variable “muda” de integración con media cero y varianza uno.

Con estos modelos será posible estimar la probabilidad de que la calificación de un tramo de vía pertenezca a una u otra categoría del Criterio Visual, mientras que por otro lado, al tratarse de un análisis de regresión, es posible identificar las variables más importantes o tipos de deterioros que explican las diferencias entre las categorías.

Para introducir la variable Criterio Visual como variable categórica, se le asignó el valor de uno (1) a malo, dos (2) a regular y tres (3) a bueno. Además para la modelación solo se tuvieron en cuenta aquellos parámetros o variables que hacen referencia a daños superficiales del pavimento y que influyen directamente en su transitabilidad; estas son: baches, fisuras, deformaciones, desprendimientos, ahuellamiento y otros daños. Las unidades en que se encuentran los datos de cada una de las variables que se utilizaron para estimar los modelos logísticos son las mismas que se utilizaron para los modelos de regresión lineal y que se muestran en la Tabla 21.

El software utilizado para estimar los modelos fue R – Project, y una vez se obtenía un modelo inicial se procedía a su reducción hasta obtener el menor número de variables que explicaran lo mejor posible los datos. Para ello se utilizó el método de selección paso a paso, "hacia atrás", eliminando aquellas variables cuyo estadístico Wald no era significativo (>0.05).

4 RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 MODELOS DE REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE

A continuación se muestran dos ejemplos del paso a paso realizado para escoger el modelo de regresión lineal óptimo para cada territorial.

Para la territorial Antioquia se puede observar en la Tabla 22 que en el primer paso se incluyeron las seis variables del Criterio Técnico seleccionadas como las variables independientes a incluir en los modelos (paso uno), pero al analizar los parámetros estadísticos, otros daños y desprendimientos resultan ser no significativas por tener P-valores mayores a 0.05. En el paso dos se estima un nuevo modelo sin incluir la variable otros daños ya que era la de mayor P-value, sin embargo desprendimientos sigue siendo no significativa y por tanto en el paso tres no se incluye. Finalmente en este último paso se consigue que todas las variables incluidas tuvieran un P-value menor a 0.05 definiéndose el modelo de Serviciabilidad más apropiado para la territorial Antioquia con las variables baches, fisuras, deformaciones y ahuellamiento.

Tabla 22. Pasos de la eliminación hacia atrás territorial Antioquia

	Paso		
	1	2	3
Constante	3.078	3.077	3.082
Baches	-5.3	-5.3	-5.2
Valor P	0.000	0.000	0.000
Fisuras	-1.78	-1.85	-1.85
Valor P	0.042	0.033	0.034
Deformaciones	-10.4	-10.2	-9.9
Valor P	0.000	0.000	0.000
Desprendimientos	-14.2	-15.4	
Valor P	0.142	0.107	
Ahuellamiento	-0.095	-0.098	-0.105
Valor P	0.000	0.000	0.000
Otros Daños	-0.8		
Valor P	0.440		
S	0.491	0.49	0.43
R-cuad.	52.06	51.88	51.08
R-cuad.(ajustado)	50.23	50.35	49.84
Cp de Mallows	7	5.6	6.2
PRESS	43.8649	43.4974	43.2332
R-cuad. (pred)	44.46	44.92	45.26

Entonces, el modelo para la territorial Antioquia está dado por la Ecuación (11):

$$\text{Criterio Visual} = 3.082 - 5.2 * \text{Bach} - 1.85 * \text{Fisu} - 9.9 * \text{Defo} - 0.105 * \text{Ahue} \quad (10)$$

Es importante analizar los signos de los coeficientes ya que estos permiten interpretar el efecto de cada una de las variables en la calificación final que se tenga. Para la territorial Antioquia los signos del modelo permiten una interpretación coherente (negativos), ya que a mayor área de baches, de fisuras, de deformaciones y a mayor ahuellamiento la calificación del estado de la vía será menor, y entre menor sea la calificación más deteriorado se encuentra el pavimento evaluado.

Dado que las variables, exceptuando ahuellamiento, están expresadas en términos de las mismas unidades, se puede realizar una comparación directa de sus coeficientes. En este modelo la variable deformaciones tiene un coeficiente mayor que el resto de variables, lo que sugiere que es la que presenta una mayor influencia en la calificación final del estado de la vía que este siendo evaluada. Si se analiza el error estándar de cada uno de los modelos, se puede observar que el modelo del paso tres es aquel que tiene el menor valor, por lo tanto es el estimador más eficiente del Criterio Visual, reconfirmándose la elección realizada teniendo en cuenta los P-values.

El segundo ejemplo que se expone es para la territorial Cauca; en la Tabla 23 se puede observar que en el primer paso se incluyeron las seis variables del Criterio Técnico seleccionadas como las variables independientes a incluir en los modelos (paso uno), pero al analizar los parámetros estadísticos, deformaciones, desprendimientos y otros daños resultan no ser significativas por tener P-values mayores a 0.05. Se realizaron cuatro pasos eliminando en cada uno de ellos la variable no significativa con mayor P-value; finalmente se definió el modelo de Serviabilidad más apropiado para la territorial Cauca con las variables baches, fisuras, y ahuellamiento como se muestra en la Ecuación (12).

$$\text{Criterio Visual} = 2.965 - 6.75 * \text{Bach} - 5.135 * \text{Fisu} - 0.144 * \text{Ahue} \quad (11)$$

Tabla 23. Pasos de la eliminación hacia atrás territorial Cauca

Paso	1	2	3	4
Constante	2.966	2.966	2.966	2.965
Baches	-6.68	-6.78	-6.84	-6.75
Valor P	0.000	0.000	0.000	0.000
Fisuras	-4.5	-4.51	-4.56	-5.13
Valor P	0.000	0.000	0.000	0.000
Deformaciones	-0.3			
Valor P	0.939			
Desprendimientos	-0.9	-0.9		
Valor P	0.702	0.697		
Ahuellamiento	-0.153	-0.153	-0.161	-0.144
Valor P	0.025	0.022	0.011	0.017
Otros Daños	-14	-14	-13	
Valor P	0.325	0.314	0.341	
S	0.2	0.197	0.194	0.194
R-cuad.	92.34	92.34	92.3	92.05

R-cuad.(ajustado)	90.7	91.01	91.27	91.29
Cp de Mallows	7	5	3.2	2
PRESS	5.76054	2.48025	1.9793	1.60961
R-cuad. (pred)	60.77	83.11	86.52	89.04

En este modelo los signos son consistentes (todos negativos) y la variable baches tiene un coeficiente mayor que el resto de variables, pudiéndose afirmar que es la que tiene una mayor influencia en la calificación final ponderada de la vía que este siendo evaluada con el mismo. Si se analiza el error estándar de cada uno de los pasos, se puede observar que el modelo del paso cuatro (4) es aquel que tiene el menor valor, por lo tanto es el estimador más eficiente del Criterio Visual, reconfirmándose la elección realizada teniendo en cuenta los P-values.

Considerando que se está modelando una variable categórica por medio de regresión lineal, no basta únicamente con determinar los coeficientes de la ecuación del modelo, sino que también se requiere determinar un rango de valores o un valor para cada categoría del Criterio Visual para poder clasificar la calificación que se obtenga ya sea como malo, regular o bueno. En este caso se precisó redondear la calificación obtenida al aplicar los modelos al entero más cercano, y clasificar un tramo de vía como bueno si se obtiene un valor de 3, regular de 2, y malo de 1.

A manera de ejemplo se presenta un tramo de la vía Turbo –Chigorodó de la territorial Antioquia que presenta los siguientes porcentajes de áreas de daños:

Tabla 24. Porcentajes de áreas de daños del tramo de la vía Turbo –Chigorodó de la territorial Antioquia que va del PR 4+0000 al PR 5+0000

Baches	Fisuras	Deformaciones	Desprendimientos	Ahuellamiento	Otros Daños
0.03%	17.34%	3.11%	0.11%	3mm	8.59%

Llevando los valores anteriores a las unidades definidas en la Tabla 21 para introducirlos al modelo se tiene:

Tabla 25. Porcentajes de áreas de daños del tramo de la vía Turbo –Chigorodó de la territorial Antioquia que va del PR 4+0000 al PR 5+0000 pasados a unidades de densidad

Baches	Fisuras	Deformaciones	Desprendimientos	Ahuellamiento	Otros Daños
0.0003	0.1734	0.0311	0.0011	3	0.0859

Introduciendo los valores anteriores a las Ecuación (11) se tiene:

$$\begin{aligned} \text{Criterio Visual} &= 3.082 - (5.2 * 0.0003) - (1.85 * 0.1734) - (9.9 * 0.0311) - (0.105 * 3) \\ &= 2.14 \end{aligned}$$

Al redondear este valor al entero más cercano se obtiene una calificación de 2, lo que clasifica al tramo de vía como en estado regular.



A continuación en la Tabla 26 se muestra un resumen con los modelos finales obtenidos para el resto de las territoriales y para todo el país.

En general se puede decir que todos los modelos presentan signos consistentes ya que todos son negativos, lo que indica que a mayor área de los diferentes daños peor será el estado de la vía.

Por otro lado, si se observan los valores de R^2 , se puede decir que los modelos para Cauca, Nariño y Valle con 92.05%, 76.49% y 73.88% respectivamente muestran una buena asociación lineal entre las variables y que son los que mejor explican la variación que tiene el Criterio Visual a partir del Criterio Técnico.



Tabla 26. Resumen modelos de regresión lineal Múltiple

TERRITORIAL	ECUACIÓN DE REGRESIÓN							R-cuad.	R-cuad. (ajustado)
	Const.	Baches	Fisuras	Deform.	Desprend.	Ahuella.	O. Daños		
Antioquia	3.082	-5.20	-1.85	-9.90		-0.1050		51.08	49.84
Bolívar	2.870	-9.20	-3.60	-9.80				29.28	28.52
Boyacá	2.907	-3.85				-0.0262	-10.90	37.33	36.68
Caquetá	2.911	-4.15	-1.08	-2.37	-4.26	-0.0335		54.92	53.54
Casanare	2.939	-3.70			-3.66	-0.0595	-3.70	57.28	56.54
Cauca	2.965	-6.75	-5.13			-0.1440		92.05	91.29
César	2.849	-2.93	-3.76	-4.20				52.93	52.55
Chocó	2.871			-12.20	-2.24	-0.0329	-5.70	62.04	60.58
Cundinamarca	2.708	-13.30		-1.44			-12.80	61.86	60.43
Huila	2.908	-2.28	-1.80	-4.88	-1.23	-0.0492		26.43	25.7
Nariño	2.889	-3.58	-0.95		-15.4	-0.0399		76.49	75.96
Santander	2.801	-12.60	-0.98	-1.81		-0.0170		35.12	34.4
Sucre	2.762		-2.81		-1.81			65.08	64.07
Tolima	2.509	-2.45	-2.79	-0.66	-1.76	-0.0470	-13.10	50.12	47.97
Valle	2.918	-7.56			-0.80	-0.0197	-4.40	73.88	73.45
Colombia	2.840	-4.74	-1.62	-1.98	-0.80	-0.0233	-2.26	42.96	42.86

4.2 MODELOS LOGIT ORDINAL

Con estos modelos lo que se desea es explicar la variable Criterio Visual asociada a tres opciones cualitativas denominadas bueno, regular o malo las cuales se denotan con los valores 3, 2 y 1 respectivamente, y la probabilidad de que la calificación de un tramo de vía sea una de estas. Definimos la variable latente Criterio Visual*, la matriz X como la matriz de variables independientes que denotan los daños que afectan la superficie de la vía y definimos β como el vector de parámetros que mide el impacto de los atributos sobre la probabilidad de que se de cierta calificación, por lo que el modelo relacionado estaría definido como se indica en la Ecuación (13).

$$\text{Criterio Visual}^* = \beta_{X_1} * X_1 + \beta_{X_2} * X_2 + \beta_{X_3} * X_3 + \beta_{X_4} * X_4 + \beta_{X_5} * X_5 + \beta_{X_6} * X_6 + \varepsilon \quad (12)$$

Dónde:

$X_1 = \text{Baches}$

$X_2 = \text{Fisuras}$

$X_3 = \text{Deformaciones}$

$X_4 = \text{Desprendimientos}$

$X_5 = \text{Ahuellamiento}$

$X_6 = \text{Otros Daños}$

Usando la Ecuación (13), los valores observados del Criterio Visual son definidos como lo indica la Ecuación (14).

$$\text{Criterio Visual} = \begin{cases} 1 & \text{si } -\infty < \text{Criterio Visual}^* < \tau_1 \\ 2 & \text{si } \tau_1 < \text{Criterio Visual}^* < \tau_2 \\ 3 & \text{si } \tau_2 < \text{Criterio Visual}^* < \infty \end{cases} \quad (13)$$

Donde τ son parámetros estimables o umbrales que precisan los valores extremos que definen cada una de estas categorías del Criterio Visual. La probabilidad de observar un valor específico del Criterio Visual se obtiene como lo indica la Ecuación (15).

$$\begin{aligned} P(\text{Criterio Visual} = 1) &= F(\tau_1 - \beta X) \\ P(\text{Criterio Visual} = 2) &= F(\tau_2 - \beta X) - F(\tau_1 - \beta X) \\ P(\text{Criterio Visual} = 3) &= 1 - F(\tau_2 - \beta X) \end{aligned} \quad (14)$$

De esta forma, la Ecuación (15) define la probabilidad de obtener una evaluación buena, regular o mala para un pavimento con ciertas características específicas relacionadas con diferentes tipos de daños.

Se recuerda que para los modelos logit, F es la función de densidad de probabilidad logística de la Ecuación (8).

A continuación se muestra a manera de ejemplo el paso a paso realizado para escoger el modelo logit óptimo para la territorial Antioquia y la territorial Nariño. El modelo óptimo debe ser aquél más reducido que explique los datos (principio de parsimonia), y que además sea congruente e interpretable. Hay que tener en cuenta que un mayor número de variables en el modelo implicará mayores errores estándar. El criterio que se utilizó para seleccionar las variables del modelo fue el estadístico del test de Wald cuyo valor debía ser mayor a ± 1.96 .

En la Tabla 27 se observa el primer paso realizado para la territorial Antioquia, en este los signos de las variables son todos negativos, El P-value de la función LR chi2 es menor a 0.05 lo que indica que los coeficientes son conjuntamente significativos y que la hipótesis de que los coeficientes son cero se rechaza, sin embargo en el siguiente paso (ver Tabla 28) se elimina la variable otros daños ya que el estadístico de Wald está por debajo de -1.96 ; en el paso 3 se elimina la variable desprendimientos por la misma razón. En la Tabla 29 se muestra el paso 3 que finalmente es elegido como el modelo por Antioquia. En este la variable fisuras a pesar de tener un estadístico de Wald menor a -1.96 se decide mantener.

Tabla 27. Paso 1 modelo logit territorial Antioquia.

Parámetro	Coficiente	S.E	Wald test
τ_1	-6.1092	0.7445	-8.21
τ_2	-2.9183	0.4722	-6.18
Baches	-30.2692	9.1714	-3.3
Fisuras	-6.1951	4.2148	-1.47
Deformaciones	-56.7015	16.6168	-3.41
Desprendimientos	-55.7997	37.9589	-1.47
Ahuellamiento	-0.4175	0.0977	-4.27
Otros Daños	-4.5366	4.6691	-0.97
	LR chi2	107.04	
	Pr(> chi2)	< 0.0001	
	R²	0.572	

Tabla 28. Paso 2 modelo logit territorial Antioquia.

Parámetro	Coficiente	S.E	Wald test
τ_1	-6.1084	0.7431	-8.21
τ_2	-2.9349	0.4742	-6.19
Baches	-28.8845	8.8328	-3.27
Fisuras	-6.8880	4.1100	-1.68
Deformaciones	-55.2595	16.5308	-3.34
Desprendimientos	-60.5216	37.6309	-1.61
Ahuellamiento	-0.4175	0.0961	-4.57
	LR chi2	106.12	
	Pr(> chi2)	< 0.0001	
	R²	0.568	

Tabla 29. Paso 3 modelo logit territorial Antioquia.

Parámetro	Coefficiente	S.E	Wald test
τ_1	-6.0466	0.7296	-8.29
τ_2	-2.9549	0.4731	-6.25
Baches	-28.6487	8.8371	-3.24
Fisuras	-6.7548	4.0827	-1.65
Deformaciones	-51.0451	15.8055	-3.23
Ahuellamiento	-0.4735	0.0941	-5.03
	LR chi2	103.46	
	Pr(> chi2)	< 0.0001	
	R²	0.558	

Finalmente el modelo óptimo para la territorial Antioquia está dado por la Ecuación (16):

$$\text{Criterio Visual}^* = -28.6487 * \text{Bach} - 6.7548 * \text{Fisu} - 51.0451 * \text{Defo} - 0.4735 * \text{Ahue} + \varepsilon \quad (15)$$

Si al aplicar la Ecuación (16) para un tramo de vía de la territorial Antioquia el valor observado de Criterio Visual está por debajo del -6.05 (umbral τ_1) su calificación será 1 o malo, si está entre -6.05 (umbral τ_1) y -2.96 (umbral τ_2) será 2 o regular y si es mayor de -2.96 (umbral τ_2) será 3 o bueno.

A manera de ejemplo también se presenta el tramo de la vía Turbo –Chigorodó de la territorial Antioquia que va desde el PR 4+0000 al PR 5+000, que presenta los porcentajes de áreas de daños mostrados en la Tabla 24.

Introduciendo los valores de la Tabla 25 a la Ecuación (16) se tiene:

$$\begin{aligned} \text{Criterio Visual}^* &= (-28.6487 * 0.0003) - (6.7548 * 0.1734) - (51.0451 * 0.0311) - (0.4735 * 3) \\ &= -4.19 \end{aligned}$$

El valor no observado de la de la variable Criterio Visual* para este ejemplo es -4.19, el cual está comprendido entre -6.05 (umbral τ_1) y -2.96 (umbral τ_2), por tanto su valor observado es 2 y el estado de la vía se define como regular.

Ahora aplicando la Ecuación (15) se determina la probabilidad de que un Administrador Vial clasifique el tramo de vía como bueno, regular o malo.

$$\begin{aligned} P(\text{Criterio Visual} = 1) &= \frac{1}{1 + e^{-(-6.05 - ((-28.6487 * 0.0003) - (6.7548 * 0.1734) - (51.0451 * 0.0311) - (0.4735 * 3)))}} = \\ P(\text{Criterio Visual} = 1) &= \frac{1}{1 + e^{(6.05 - 4.19)}} = 0.13 = 13\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & (Criterio Visual = 2) \\
 & = \frac{1}{1 + e^{-(-2.96 - ((-28.6487 * 0.0003) - (6.7548 * 0.1734) - (51.0451 * 0.0311) - (0.4735 * 3))}} \\
 & - \frac{1}{1 + e^{-(-6.05 - ((-28.6487 * 0.0003) - (6.7548 * 0.1734) - (51.0451 * 0.0311) - (0.4735 * 3))}} =
 \end{aligned}$$

$$P(Criterio Visual = 2) = \frac{1}{1 + e^{(2.96 - 4.19)}} - \frac{1}{1 + e^{(6.05 - 4.19)}} = 0.64 = 64\%$$

$$\begin{aligned}
 & P(Criterio Visual = 3) \\
 & = 1 - \frac{1}{1 + e^{-(-2.96 - ((-28.6487 * 0.0003) - (6.7548 * 0.1734) - (51.0451 * 0.0311) - (0.4735 * 3))}} \\
 & - \frac{1}{1 + e^{-(-6.05 - ((-28.6487 * 0.0003) - (6.7548 * 0.1734) - (51.0451 * 0.0311) - (0.4735 * 3))}} =
 \end{aligned}$$

$$P(Criterio Visual = 3) = 1 - \frac{1}{1 + e^{(2.96 - 4.19)}} - \frac{1}{1 + e^{(6.05 - 4.19)}} =$$

$$P(Criterio Visual = 3) = 1 - 0.13 - 0.64 = 0.23 = 23\%$$

La probabilidad de que un tramo con 0.03% de baches, 17.34% de fisuras, 3.11% deformaciones y 3mm de ahuellamiento, de la vía Turbo – Chigorodo, sea calificada por un Administrador Vial como bueno es del 23%, como regular del 64% y como malo del 13%.

Ahora, con el fin de evaluar el impacto de cada uno de deterioros en la probabilidad de observar cada uno de los posibles valores de la variable Criterio Visual, se realizó un análisis de sensibilidad del modelo que consistió en tomar cada variable y asignarle diferentes porcentajes de área mientras las demás variables se hacían cero.

Para el análisis de sensibilidad hecho para la variable baches, en general se puede decir que cuando no haya área con este daño hay una probabilidad del 95% de que el Administrador Vial califique la vía como buena y solo una probabilidad del 5% de que la califique como regular; cuando haya un área de hasta el 10% lo más probables es que también se califique como buena, pero cuando haya entre 15% y 20% de área de baches lo más probables es que la califique como regular. Estos resultados se pueden ver en la Tabla 30 y se exponen gráficamente en la Figura 37.

Tabla 30. Probabilidad de observar cada uno de los posibles valores de la variable Criterio Visual cuando las áreas de baches para la territorial Antioquia varían

BACHES (%)	K=1	K=2	K=3
	MALO	REGULAR	BUENO
0%	0%	5%	95%
5%	1%	17%	82%
10%	4%	44%	52%
15%	15%	64%	21%
20%	42%	52%	6%

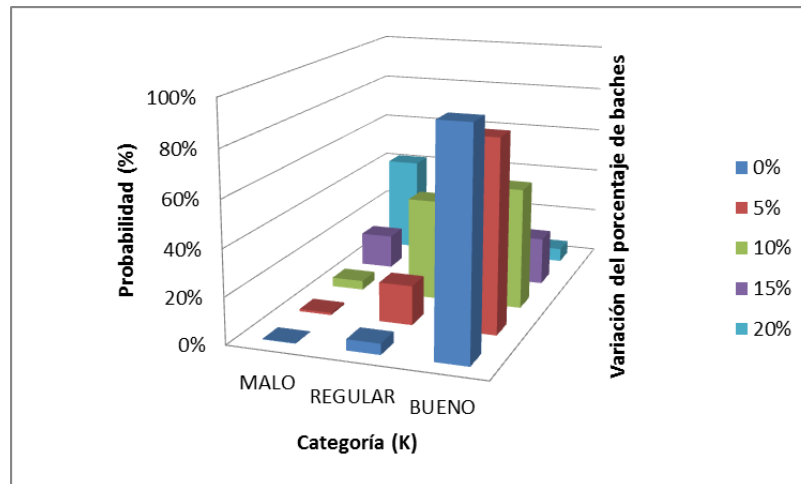


Figura 37. Probabilidad de observar cada uno de los posibles valores de la variable Criterio Visual cuando las áreas de baches para la territorial Antioquia varían

La Tabla 31 detalla el análisis de sensibilidad para la variable fisuras; los resultados sugieren que esta variable por sí sola no tiene un gran impacto en variable Criterio Visual, ya que cuando se tienen porcentajes de áreas de este daño comprendidos entre 0% y 20% lo más probable es que el Administrador Vial de una calificación de bueno. Estos resultados se pueden ver en y en la Figura 38.

Tabla 31. Probabilidad de observar cada uno de los posibles valores de la variable Criterio Visual cuando las áreas de fisuras para la territorial Antioquia varían

FISURAS (%)	K=1	K=2	K=3
	MALO	REGULAR	BUENO
0%	0%	5%	95%
5%	0%	6%	93%
10%	0%	9%	91%
15%	1%	12%	87%
20%	1%	16%	83%

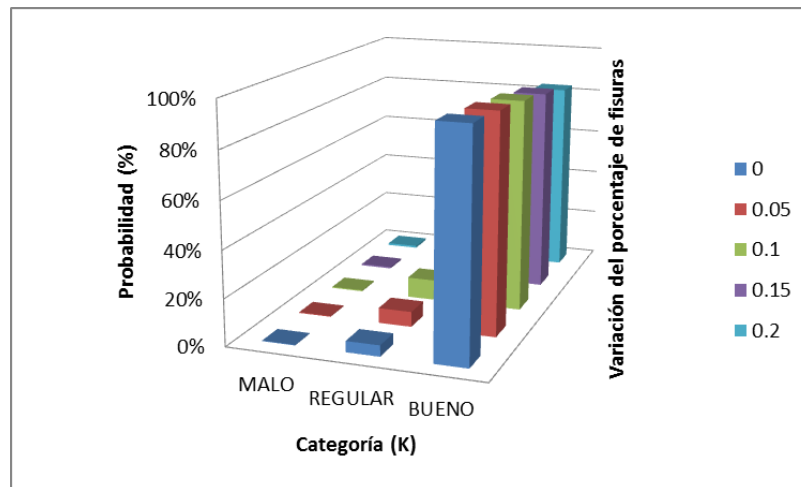


Figura 38. Probabilidad de observar cada uno de los posibles valores de la variable Criterio Visual cuando las áreas de fisuras para la territorial Antioquia varían

Para la variable deformaciones, en general se puede decir que su impacto en el valor observado de la variable Criterio Visual es considerable ya que cuando no haya área dañada o cuando haya menos del 5%, lo más probable es que el valor observado de la variable Criterio Visual sea tres (3) o bueno, cuando haya entre 5% y 10% lo más probables es que sea dos (2) o regular y cuando haya más del 10% uno (1) o malo. Estos resultados se pueden ver en la Tabla 32 y se exponen gráficamente en la Figura 39.

Tabla 32. Probabilidad de observar cada uno de los posibles valores de la variable Criterio Visual cuando las áreas de deformaciones para la territorial Antioquia varían

DEFORMACIONES (%)	K=1 MALO	K=2 REGULAR	K=3 BUENO
0%	0%	5%	95%
5%	3%	37%	60%
10%	28%	62%	10%
15%	83%	16%	1%
20%	98%	1%	0%

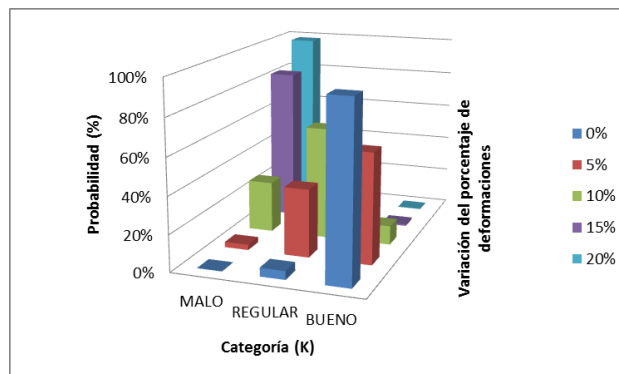


Figura 39. Probabilidad de observar cada uno de los posibles valores de la variable Criterio Visual cuando las áreas de fisuras para la territorial Antioquia varían

Para la variable ahuellamiento, en general se puede decir que cuando el valor de este daño está entre 2mm y 6mm, lo más probable es que el valor observado de la variable Criterio Visual sea tres (3) o bueno, cuando este entre 6mm y 10 mm lo más probables es que sea dos (2) o regular y cuando este sea mayor de 10mm uno (1) o malo. Estos resultados se pueden ver en la Tabla 33 y se exponen gráficamente en la Figura 40.

Tabla 33. Probabilidad de observar cada uno de los posibles valores de la variable Criterio Visual cuando los valores del ahuellamiento para la territorial Antioquia varían

AHUELLAMIENTO (MM)	K=1	K=2	K=3
	MALO	REGULAR	BUENO
2	1%	11%	88%
4	2%	24%	74%
6	4%	43%	53%
8	9%	60%	30%
10	21%	64%	14%

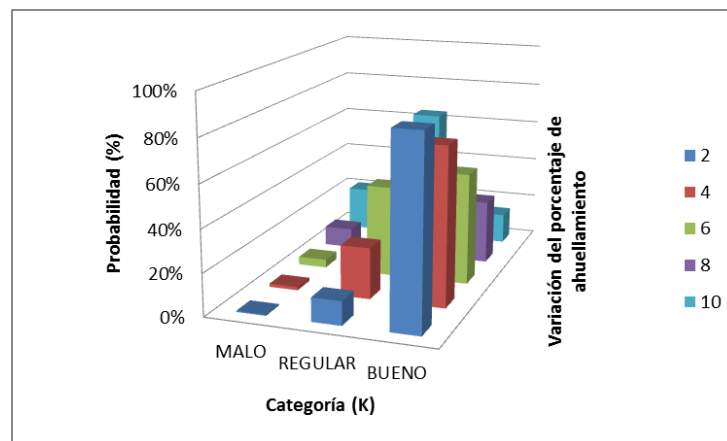


Figura 40. Probabilidad de observar cada uno de los posibles valores de la variable Criterio Visual cuando los valores del ahuellamiento para la territorial Antioquia varían

A continuación en la Tabla 34 se muestra un resumen con los modelos finales obtenidos para el resto de las territoriales y para todo el país.



Tabla 34. Resumen modelos logit ordinal

TERRITORIAL	ECUACIÓN LOGIT						Umbral 1 (τ_1)	Umbral 2 (τ_2)	R ²	LR chi2	PR(<chi2)
	Baches (X ₁)	Fisuras (X ₂)	Deform. (X ₃)	Desprend. (X ₄)	Ahuella. (X ₅)	O. Daños (X ₆)					
Antioquia	-28.649	-6.75	-51.05		-0.4735		-6.0466	-2.9549	0.56	103.46	<0.0001
Bolívar	-33.328	-11.09	-30.67				-3.3416	-1.8086	0.26	64.39	<0.0001
Boyacá	-18.171		-22.01		-0.1086	-30.23	-5.1557	-2.3129	0.51	173.53	<0.0001
Caquetá	-19.398	-4.99	-10.27	-16.47	-0.1913		-6.0255	-2.1072	0.62	131.78	<0.0001
César	-9.348	-14.77					-3.9184	-1.8820	0.48	176.57	<0.0001
Cundinamarca	-87.635		-8.12			-88.38	-7.1094	-1.2312	0.72	81.70	<0.0001
Huila	-8.144	-9.16	-20.64	-6.08	-0.2684		-5.8918	-2.0572	0.30	128.37	<0.0001
Nariño		-8.79	-18.32	-38.45	-0.0953		-7.0534	-3.6555	0.86	244.95	<0.0001
Santander	-61.260	-3.46	-5.51		-0.0441		-3.4785	-1.5226	0.39	147.93	<0.0001
Sucre		-11.59		-7.44			-4.3885	-1.6438	0.70	69.72	<0.0001
Tolima	-18.687	-12.59	-3.09	-7.63			-4.3361	-0.3878	0.56	97.75	<0.0001
Valle			-15.20	-4.26	-0.0803		-6.1852	-1.9718	0.63	195.82	<0.0001
Colombia	-23.241	-5.82	-6.74	-2.58	-0.0843	-9.38	-4.2880	-1.6853	0.47	1652.97	<0.0001

Al igual que en el modelo de regresión lineal, entre mayor sea el coeficiente para una variable, mayor es la incidencia que tiene sobre el modelo. La variable otros daños es la que aparece en la menor cantidad de modelos, seguida de la variable desprendimientos.

En los modelos logit los signos de todas las variables también son negativos lo que implica que un incremento en uno u otro de los atributos va a disminuir la probabilidad de obtener un valor alto para el Criterio Visual (Criterio Visual = 3) y al mismo tiempo aumentar la probabilidad de tener un valor bajo (Criterio Visual = 1).

Si se observan los valores de R², se puede decir que el modelo para Nariño y Sucre con 0.86 y 0.7 respectivamente son los que mejor explican la variación que tiene el Criterio Visual a partir del Criterio Técnico.

En la Tabla 35 se muestra el resumen de los umbrales para cada una de las territoriales.

Tabla 35. Resumen de rangos de las categorías del Criterio Visual para los modelos logit

TERRITORIAL	CATEGORIA		
	MALO (1)	REGULAR (2)	BUENO (3)
Antioquia	<-6.05	-6.05--2.96	>-2.96
Bolívar	<-3.35	-3.35--1.81	>-1.81
Boyacá	<-5.16	-5.16--2.32	>2.32
Caquetá	<-6.03	-6.03--2.11	>-2.11
César	<-3.92	-3.92--1.89	>-1.89
Cundinamarca	<-7.11	-7.11--1.24	>-1.24
Huila	<-5.9	-5.9--2.06	>-2.06
Nariño	<-7.06	-7.06--3.66	>-3.66
Santander	<-3.48	-3.48--1.53	>-1.53
Sucre	<-4.39	-4.39--1.65	>-1.65
Tolima	<-4.34	-4.34--0.39	>-0.39
Valle	<-6.19	-6.19--1.98	>-1.98
Colombia	<-4.29	-4.29--1.69	>-1.69

4.3 MODELOS PROBIT ORDINAL

Para los modelos probit se tuvieron en cuenta los mismos criterios de selección de variables de los modelos logit. Igualmente, para mostrar cómo se realizó el procedimiento, se describirán los pasos realizados para la territorial Caquetá y la territorial Huila, luego para el resto de modelos se mostrara un resumen en la Tabla 45.

En la Tabla 36 se observa el primer paso de la territorial Caquetá, en este los signos de las variables son todos negativos como es de esperarse, el P-value de la función LR chi² es menor a 0.05 lo que indica que los coeficientes son conjuntamente significativos y que la hipótesis de que los coeficientes son cero se rechaza, sin embargo en el siguiente paso (Tabla 37) se elimina la variable otros daños ya que el P-value del estadístico de Wald está por encima de 0.05; en este segundo paso se logra conseguir que el todas las variables incluidas sean significativas, teniendo finalmente la Ecuación (17):

$$\text{Criterio Visual}^* = -9.8981 * \text{Bach} - 2.6875 * \text{Fisu} - 5.8371 * \text{Defo} - 9.9262 * \text{Desp} - 0.1020 * \text{Ahue} + \varepsilon \quad (16)$$

Los modelos probit ordinal, también arrojan los valores de umbrales “umbral1” y “umbral2”. Para la territorial Caquetá estos valores son -3.24 y -1.16 respectivamente, lo que quiere decir que las calificaciones que sean menores a -3.24 corresponden a la categoría malo, los resultados que estén entre -3.24 y -1.16 corresponden a la categoría regular y los resultados que sean mayores de -1.16 corresponden a la categoría bueno.

Tabla 36. Paso 1 modelo probit territorial Caquetá.

Parámetro	Coefficiente	S.E	Wald test
τ_1	-3.2400	0.3064	-10.57
τ_2	-1.1605	0.1869	-6.21
Baches	-9.7563	2.4679	-3.95
Fisuras	-2.6974	0.7015	-3.84
Deformaciones	-5.9045	2.0279	-2.91
Desprendimientos	-9.6011	2.7369	-3.51
Ahuellamiento	-0.1019	0.0191	-5.34
Otros Daños	-43.7727	100.6223	-0.44
	LR chi2	127.91	
	Pr(> chi2)	< 0.0001	
	R²	0.610	

Tabla 37. Paso 2 modelo probit territorial Caquetá.

Parámetro	Coefficiente	S.E	Wald test
τ_1	-3.2447	0.3067	-10.58
τ_2	-1.1634	0.1868	-6.23
Baches	-9.8981	2.4535	-4.03
Fisuras	-2.6875	0.7017	-3.83
Deformaciones	-5.8371	2.0232	-2.89
Desprendimientos	-9.9262	2.6696	-3.72
Ahuellamiento	-0.1020	0.0191	-5.34
	LR chi2	127.54	
	Pr(> chi2)	< 0.0001	
	R²	0.609	

A manera de ejemplo se presenta el tramo de la vía San José del Fragua-Florencia de la territorial Caquetá que va desde el PR 30+0000 al PR 31+000, que presenta los porcentajes de áreas de daños mostrados en la Tabla 38.

Tabla 38. Porcentajes de áreas de daños del tramo de la vía San José del Fragua - Florencia de la territorial Caquetá que va desde el PR 30+0000 al PR 31+000

Baches	Fisuras	Deformaciones	Desprendimientos	Ahuellamiento	Otros Daños
17.50%	12.50%	5.00%	11.50%	0	0.00%

Llevando los valores anteriores a las unidades definidas en la Tabla 21 para introducirlos al modelo se tiene:

Tabla 39. Porcentajes de áreas de daños del tramo de la vía San José del Fragua - Florencia de la territorial Caquetá que va desde el PR 30+0000 al PR 31+000

Baches	Fisuras	Deformaciones	Desprendimientos	Ahuellamiento	Otros Daños
0.1750	0.1250	0.05	0.1150	0	0

Introduciendo los valores de la Tabla 39 a las Ecuación (17) se tiene:

$$\begin{aligned} \text{Criterio Visual}^* &= (-9.8981 * 0.1750) - (2.6875 * 0.1250) - (5.8371 * 0.05) - (9.9262 * 0.1150) \\ &\quad - (0.1020 * 0) = -3.50 \end{aligned}$$

El valor no observado de la de la variable Criterio Visual* para este ejemplo es - 3.50, el cual está menor a -3.24 (umbral τ_1), por tanto su valor observado es 1 y el estado de la vía se define como malo.

Ahora aplicando la Ecuación (15) se determina la probabilidad de que un Administrador Vial clasifique el tramo de vía como bueno, regular o malo.

Se recuerda que para los modelos probit, F es la función de distribución acumulativa (cdf) de una normal estandarizada mostrada en la Ecuación (9).

$$P(\text{Criterio Visual} = 1) = \int_{-\infty}^{-(-3.24 - ((-9.8981 * 0.1750) - (2.6875 * 0.1250) - (5.8371 * 0.05) - (9.9262 * 0.1150) - (0.1020 * 0)))} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp(-t^2/2) dt = 60\%$$

$$P(\text{Criterio Visual} = 2) = \int_{-\infty}^{-(-1.16 - ((-9.8981 * 0.1750) - (2.6875 * 0.1250) - (5.8371 * 0.05) - (9.9262 * 0.1150) - (0.1020 * 0)))} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp(-t^2/2) dt - \int_{-\infty}^{-(-3.24 - ((-9.8981 * 0.1750) - (2.6875 * 0.1250) - (5.8371 * 0.05) - (9.9262 * 0.1150) - (0.1020 * 0)))} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp(-t^2/2) dt = 39\%$$

$$P(\text{Criterio Visual} = 3) = 100\% - 60\% - 39\% = 1\%$$

La probabilidad de que un Administrador Vial califique el tramo seleccionado de la vía San José del Fragua-Florencia como bueno es del 9%, como regular del 35% y como malo del 56%.

Ahora, con el fin de evaluar el impacto de cada uno de deterioros en la probabilidad de observar cada uno de los posibles valores de la variable Criterio Visual, se realizó un análisis de sensibilidad del modelo que consistió en tomar cada variable y asignarle diferentes porcentajes de área mientras las demás variables se hacían cero.

Para el análisis de sensibilidad hecho para la variable baches, en general se puede decir que cuando no haya área con este daño hay una probabilidad del 76% de que el Administrador Vial califique la vía como buena, una probabilidad del 20% de que la califique como regular y una probabilidad del 4% de que la califique como mala; cuando haya un área de hasta el 10% lo más probables es que también se califique como buena, pero cuando haya entre 15% y 20% de área de baches lo más probables es que la califique como regular. Estos resultados se pueden ver en la Tabla 40 y se exponen gráficamente en la Figura 41.

Tabla 40. Probabilidad de observar cada uno de los posibles valores de la variable Criterio Visual cuando las áreas de baches para la territorial Caquetá varían

BACHES (%)	K=1	K=2	K=3
	MALO	REGULAR	BUENO
0%	4%	20%	76%
5%	6%	28%	66%
10%	9%	36%	54%
15%	15%	43%	42%
20%	22%	47%	31%

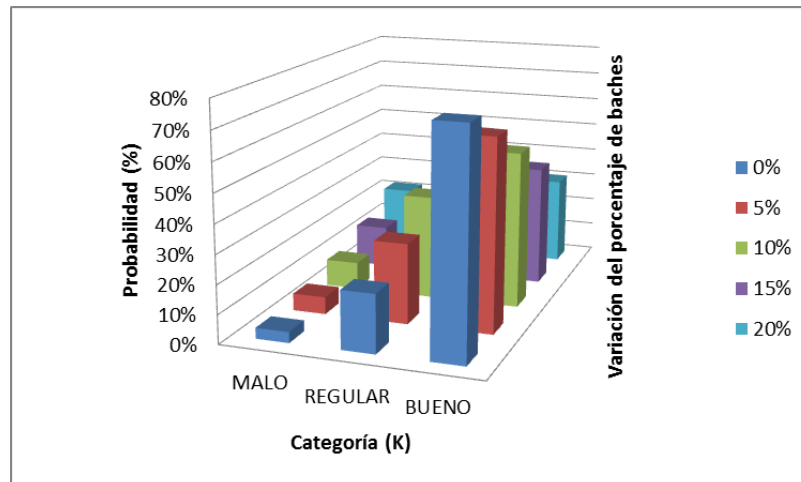


Figura 41. Probabilidad de observar cada uno de los posibles valores de la variable Criterio Visual cuando las áreas de baches para la territorial Caquetá varían

La Tabla 41 detalla el análisis de sensibilidad para la variable fisuras; los resultados sugieren que esta variable por sí sola no tiene un gran impacto en variable Criterio Visual, ya que cuando se tienen porcentajes de áreas de este daño comprendidos entre 0% y 20% lo más probable es que el Administrador Vial de una calificación de bueno. Estos resultados se pueden ver en y en la Figura 42.

Tabla 41. Probabilidad de observar cada uno de los posibles valores de la variable Criterio Visual cuando las áreas de fisuras para la territorial Caquetá varían

FISURAS (%)	K=1	K=2	K=3
	MALO	REGULAR	BUENO
0%	4%	20%	76%
5%	4%	22%	74%
10%	5%	24%	71%
15%	6%	26%	68%
20%	6%	29%	65%

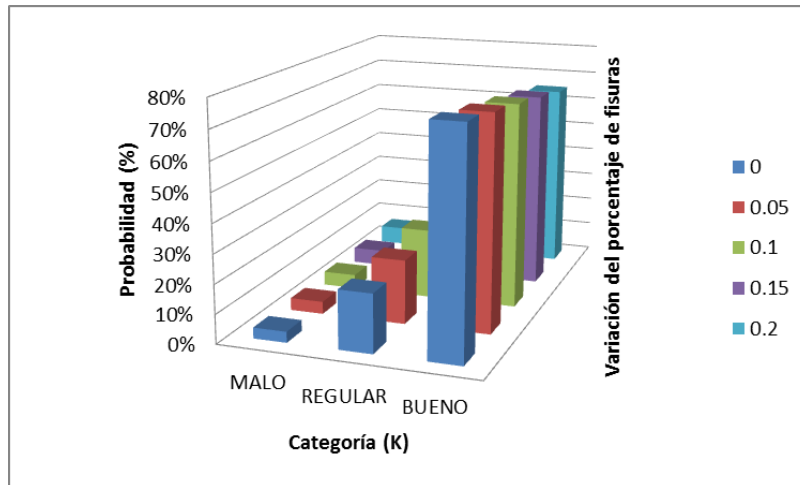


Figura 42. Probabilidad de observar cada uno de los posibles valores de la variable Criterio Visual cuando las áreas de fisuras para la territorial Antioquia varían

Para la variable deformaciones, por sí sola tampoco tiene gran impacto en que el estado de una vía sea regular o mala, ya que cuando se tienen porcentajes de áreas de este daño comprendidos entre 0% y 20% lo más probable es que el valor observado de la variable Criterio Visual sea tres (3) o bueno. Estos resultados se pueden ver en la Tabla 42 y en la Figura 43.

Tabla 42. Probabilidad de observar cada uno de los posibles valores de la variable Criterio Visual cuando las áreas de deformaciones para la territorial Caquetá varían

DEFORMACIONES (%)	K=1	K=2	K=3
	MALO	REGULAR	BUENO
0%	4%	20%	76%
5%	5%	25%	71%
10%	7%	29%	64%
15%	9%	34%	57%
20%	11%	39%	50%

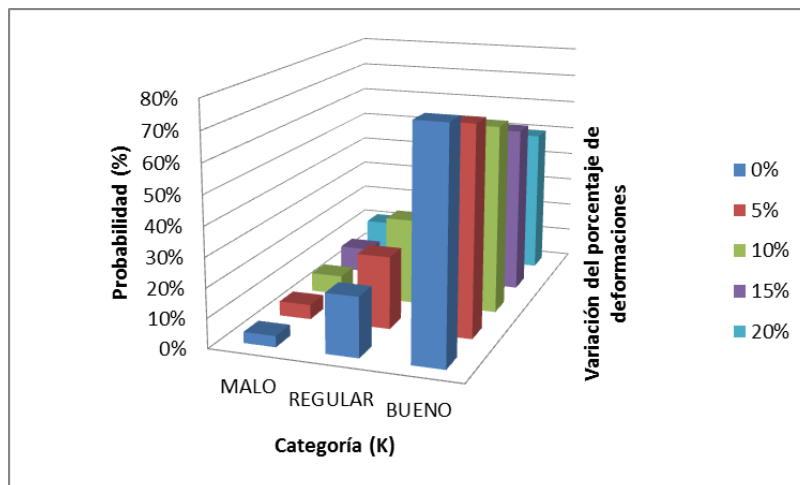


Figura 43. Probabilidad de observar cada uno de los posibles valores de la variable Criterio Visual cuando las áreas de fisuras para la territorial Caquetá varían

Para la variable desprendimientos, en general se puede decir que cuando no haya área dañada o cuando haya menos del 10%, lo más probable es que el valor observado de la variable Criterio Visual sea tres (3) o bueno, cuando haya entre 10% y 20% lo más probables es que sea dos (2) o regular. Estos resultados se pueden ver en la Tabla 43 y se exponen gráficamente en la Figura 44.

Tabla 43. Probabilidad de observar cada uno de los posibles valores de la variable Criterio Visual cuando las áreas de desprendimientos para la territorial Caquetá varían

DESPRENDIMIENTOS (%)	K=1	K=2	K=3
	MALO	REGULAR	BUENO
0%	4%	20%	76%
5%	6%	28%	66%
10%	10%	36%	54%
15%	15%	43%	42%
20%	22%	47%	31%

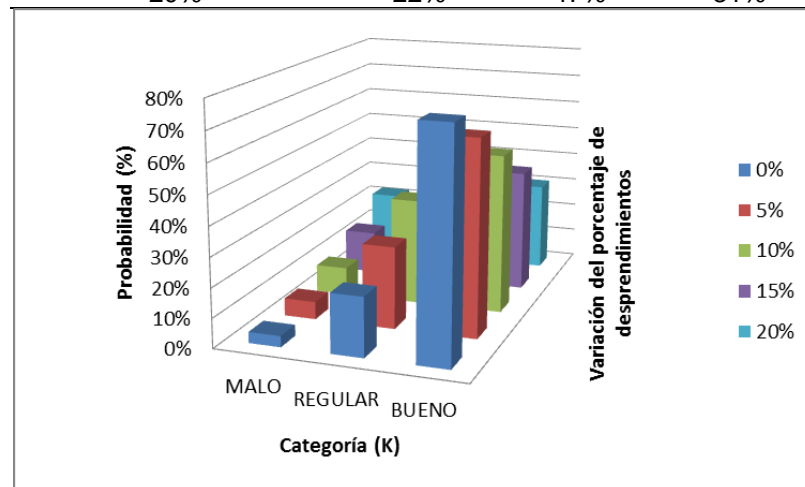


Figura 44. Probabilidad de observar cada uno de los posibles valores de la variable Criterio Visual cuando las áreas de desprendimientos para la territorial Caquetá varían

Para la variable ahuellamiento, en general se puede decir que cuando el valor de este daño está entre 2mm y 6mm, lo más probable es que el valor observado de la variable Criterio Visual sea tres (3) o bueno, cuando este entre 6mm y más de 10mm dos (2) o regular. Estos resultados se pueden ver en la Tabla 44 y se exponen gráficamente en la Figura 45.

Tabla 44. Probabilidad de observar cada uno de los posibles valores de la variable Criterio Visual cuando los valores del ahuellamiento para la territorial Antioquia varían

AHUELLAMIENTO (MM)	K=1	K=2	K=3
	MALO	REGULAR	BUENO
2	1%	11%	88%
4	2%	24%	74%
6	4%	43%	53%
8	9%	60%	30%
10	21%	64%	14%

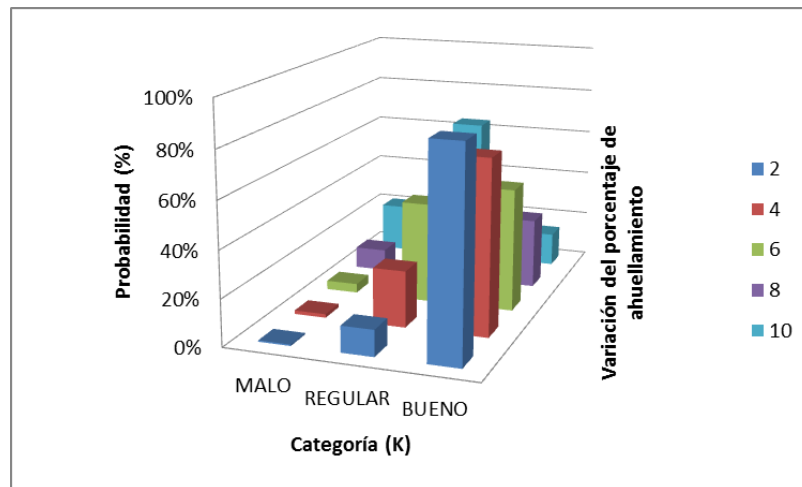


Figura 45. Probabilidad de observar cada uno de los posibles valores de la variable Criterio Visual cuando los valores del ahuellamiento para la territorial Antioquia varían
 A continuación en la Tabla 45 se muestra un resumen con los modelos finales obtenidos para el resto de las territoriales y para todo el país.



Tabla 45. Resumen modelos probit ordinal

TERRITORIAL	ECUACIÓN LOGIT						Umbral 1 (τ_1)	Umbral 2 (τ_2)	LR chi2	PR(<chi2)	R ²
	Baches (X ₁)	Fisuras (X ₂)	Deform. (X ₃)	Desprend. (X ₄)	Ahuella. (X ₅)	O. Daños (X ₆)					
Antioquia	-17.931	-3.57	-24.34		-0.2747		-3.4330	-1.7240	104.25	<0.0001	0.56
Bolívar	-15.197	-6.60	-19.07				-1.9234	-1.0895	65.57	<0.0001	0.27
Boyacá	-8.782		-12.75		-0.0652	-19.28	-3.0475	-1.3961	174.82	<0.0001	0.51
Caquetá	-9.898	-2.69	-5.84	-9.93	-0.102		-3.2447	-1.1634	127.54	<0.0001	0.61
César	-5.605	-8.093					-2.1767	-1.1193	176.41	<0.0001	0.48
Cundinamarca	-42.769		-4.42			-48.37	-3.7368	-0.6505	79.72	<0.0001	0.71
Huila	-4.820	-5.40	-11.26	-3.35	-0.1469		-3.1607	-1.2189	128.39	<0.0001	0.30
Nariño		-5.06	-11.86	-21.42	-0.0498		-3.8499	-2.0711	245.16	<0.0001	0.86
Santander	-36.355	-2.07	-3.20		-0.0247		-1.9994	-0.9119	148.18	<0.0001	0.39
Sucre		-6.70		-4.27			-2.4980	-0.9752	69.67	<0.0001	0.70
Tolima	-8.790	-6.62	-1.59	-4.37			-2.3103	-0.1338	94.18	<0.0001	0.55
Valle			-9.00	-2.04	-0.644		-3.3528	-1.157	187.97	<0.0001	0.61
Colombia	-11.550	-3.47	-3.98	-1.53	-0.0477	-5.41	-2.4083	-0.9924	1618.30	<0.0001	0.46

Al igual que en el modelo de regresión lineal y el logit, entre mayor sea el coeficiente para una variable, mayor es la incidencia que tiene esta variable sobre el modelo. La variable otros daños es la que aparece en la menor cantidad de modelos, seguida de la variable desprendimientos.

Si se observan los valores de R² de los modelos, se puede decir que el modelo para Nariño y Cundinamarca con 0.86 y 0,71 respectivamente son los que mejor explican la variación que tiene el Criterio Visual a partir del Criterio Técnico.

En la Tabla 46 se muestra el resumen de los umbrales para cada una de las territoriales.

Tabla 46. Resumen de rangos de las categorías del Criterio Visual para los modelos probit

TERRITORIAL	CATEGORIA		
	MALO	REGULAR	BUENO
Antioquia	<-3.44	-3.44--1.73	>-1.73
Bolívar	<-1.93	-1.93--1.09	>-1.09
Boyacá	<-3.05	-3.05--1.4	>-1.4
Caquetá	<-3.25	-3.25--1.17	>-1.17
César	<-2.18	-2.18--1.12	>-1.12
Cundinamarca	<-3.74	-3.74--0.66	>-0.66
Huila	<-3.17	-3.17--1.22	>-1.22
Nariño	<-3.85	-3.85--2.08	>-2.08
Santander	<-2	-2--0.92	>-0.92
Sucre	<-2.5	-2.5--0.98	>-0.98
Tolima	<-2.32	-2.32--0.14	>-0.14
Valle	<-3.36	-3.36--1.16	>-1.16
Colombia	<-2.41	-2.41--1	>-1

4.4 COMPARACIÓN DE MODELOS

Se determinó el grado de predicción de cada uno de los tipos de modelos para cada territorial para comparar que tan asertivos son y cuál es el que mejor predice el estado de una vía. Los resultados se pueden observar en la Tabla 47.

Para hacer esta predicción se comparó la calificación dada por un Administrador Vial a cada uno de los tramos de una territorial, con la calificación obtenida al aplicar los modelos estimados en esta investigación; El grado de predicción es igual al número de tramos cuyas calificaciones coinciden entre el número total de tramos evaluados.

Como se mencionó anteriormente el modelo logit y el modelo probit se diferencian únicamente en el supuesto de la función de densidad que se emplea, por tanto los resultados estimados por ambos modelos no difieren mucho entre sí, siendo las diferencias operativas, debidas a la complejidad que presenta el cálculo de la función de distribución normal frente a la logística, ya que la primera solo puede calcularse en forma de integral (Medina, 2003).

Para los modelos logit y probit de una misma territorial se definieron las mismas variables como significativas, los R^2 resultaron ser muy similares, al igual que los grados de predicción.

Como se puede detallar en la mayoría de los casos los modelos logit logran un mayor grado de predicción, a excepción del caso de la territorial Boyacá, Sucre, Tolima y Valle donde los modelos de regresión lineal tienen una predicción mayor.

Para la territorial Huila se tiene el mismo grado de predicción para los tres casos por lo que es indiferente usar un modelo u otro para predecir la Serviabilidad de sus vías.

Tabla 47. Comparación de los modelos logit y probit

TERRITORIAL	MODELO	Predicción
Antioquia	Regresión Lineal	68%
	Logit	72%
	Probit	71%
Bolívar	Regresión Lineal	70%
	Logit	75%
	Probit	75%
Boyacá	Regresión Lineal	56%
	Logit	52%
	Probit	50%
Caquetá	Regresión Lineal	72%
	Logit	75%
	Probit	75%
César	Regresión Lineal	80%
	Logit	81%
	Probit	81%
Cundinamarca	Regresión Lineal	82%
	Logit	85%
	Probit	83%
Huila	Regresión Lineal	74%
	Logit	74%
	Probit	74%
Nariño	Regresión Lineal	77%
	Logit	86%
	Probit	86%
Santander	Regresión Lineal	60%
	Logit	68%
	Probit	69%
Sucre	Regresión Lineal	78%
	Logit	72%
	Probit	72%
Tolima	Regresión Lineal	79%
	Logit	77%
	Probit	77%
Valle	Regresión Lineal	84%
	Logit	81%
	Probit	14%
Colombia	Regresión Lineal	64%
	Logit	69%
	Probit	68%

5 CONCLUSIONES

De la presente investigación se puede concluir que a pesar de haber incongruencias al comparar para un mismo tramo los resultados del Criterio Visual y del Criterio Técnico haciendo uso de diagramas de dispersión y de caja, estadísticamente si existe una clara correlación entre los dos criterios desarrollados por el INVIAS, y que por tanto es posible desarrollar modelos predictivos de la variable Criterio Visual transformada en variable categórica a partir de la variable Criterio Técnico.

Basados en lo anterior se desarrollaron tres tipos de modelos, regresión lineal, logit y probit, pudiéndose concluir por cada territorial lo siguiente:

- **Antioquia:** Los tres modelos coinciden en que las variables que mejor predicen el estado de las vías de esta territorial son baches, fisuras, deformaciones y ahuellamiento, siendo deformaciones la que mayor coeficiente presenta y por tanto mayor influencia en el deterioro del pavimento.
- **Bolívar:** Los tres modelos coinciden en que las variables que mejor predicen el estado de las vías de esta territorial son baches, fisuras, y deformaciones, siendo nuevamente deformaciones la que mayor coeficiente presenta y por tanto mayor influencia en el deterioro del pavimento.
- **Boyacá:** El modelo de regresión se definió con las variables baches, ahuellamiento y otros daños; los modelos logit y probit están definidos por estas mismas variables, pero adicionalmente incluyen la variable deformaciones. Otros daños es la variable que mayor coeficiente presenta y por tanto mayor influencia en el deterioro del pavimento.
- **Caquetá:** Para esta territorial en los tres modelos todas las variables son significativas a excepción de otros daños; baches y desprendimientos son las de mayores coeficientes y por tanto mayor influencia en la calificación final que se obtenga de la vía.
- **Casanare:** De esta territorial solo fue posible estimar el modelo de regresión lineal. Las variables incluidas en dicho modelo fueron baches, desprendimientos, ahuellamiento y otros daños, teniendo todas grandes afecciones a la calificación final obtenida.
- **Cauca:** De esta territorial solo fue posible estimar el modelo de regresión lineal, ya que para los otros dos modelos no resulto ninguna variable significativa. Las variables incluidas en el modelo fueron baches, fisuras y ahuellamiento, teniendo todas grandes afecciones a la calificación final obtenida.
- **César:** El modelo de regresión se definió con las variables baches, fisuras y deformaciones; los modelos logit y probit están definidos solo por baches y fisuras.

- **Chocó:** De esta territorial solo fue posible estimar el modelo de regresión lineal. Las variables significativas y que más influencia tienen en el deterioro de los pavimentos de esta región del país son deformaciones, desprendimientos, ahuellamiento y otros daños, siendo deformaciones la de mayor afección a la calificación final dada a la vía.
- **Cundinamarca:** Los tres modelos coinciden en que las variables que mejor predicen el estado de las vías de esta territorial son baches, fisuras, deformaciones y otros daños, siendo baches y otros daños las que mayores coeficientes presentan y por tanto mayor influencia en el deterioro del pavimento.
- **Huila:** Para esta territorial en los tres modelos todas las variables son significativas a excepción de otros daños; deformaciones es la de mayor coeficientes y por tanto la de mayor influencia en la calificación final que se obtenga de la vía.
- **Nariño:** El modelo de regresión se definió con las variables baches, fisuras, desprendimientos y ahuellamiento, mientras que los modelos logit y probit se definieron con las variables fisuras, deformaciones, desprendimientos y ahuellamiento. A pesar de que los modelos no presentan las mismas variables, coinciden en que desprendimientos es la que mayor coeficiente presenta y por tanto mayor influencia en el deterioro del pavimento.
- **Santander:** Los tres modelos coinciden en que las variables que mejor predicen el estado de las vías de esta territorial son baches, fisuras, deformaciones y ahuellamiento, siendo baches la que mayor coeficiente presenta y por tanto mayor influencia en el deterioro del pavimento.
- **Sucre:** Esta territorial es la que menor número de variables presenta en sus modelos, solo fisuras y desprendimiento para los tres.
- **Tolima:** El modelo de regresión se definió con todas las variables, mientras que los modelos logit y probit se definieron con las variables baches, fisuras, deformaciones y desprendimientos. En general se podría decir que para los tres modelos baches es la variable que mayor influencia tiene en el deterioro del pavimento.
- **Valle:** El modelo de regresión se definió con las variables baches, desprendimientos, ahuellamiento y otros daños, mientras que los modelos logit y probit se definieron por las variables deformaciones, desprendimientos y ahuellamiento.
- **Colombia:** Para todo el territorio nacional y para los tres tipos de modelos implementados, todas las variables resultan significativas. Baches es la que mayor influencia presenta en la calificación final que se le dé a una vía.

De los modelos de regresión lineal en general se puede decir que la variable baches es significativa para casi todos los modelos, a excepción de los de las territoriales Choco y Sucre, mientras que la variable otros daños es la que menos se repite entre todos. En cuanto al coeficiente de determinación R^2 , los modelos de Cauca y Nariño son los que presentan valores elevados y por tanto se podría

decir que son los que presentan el mejor ajuste, sin embargo en el análisis de una regresión el objetivo no es obtener un valor elevado de R^2 , sino obtener estimadores precisos de los verdaderos coeficientes de regresión poblacional. Lo importante es que el resto de modelos que presentan un coeficiente de determinación bajo tienen variables explicativas con relevancia lógica, signos correctos y significancia estadística. Si en este proceso se obtiene un valor de R^2 elevado, muy bien, aunque ello no es evidencia a favor del modelo, y si este valor es pequeño, esto no significa que el modelo sea necesariamente malo.

En los modelos logit y probit las variables baches, fisuras y deformaciones son significativas para casi todos los modelos que se estimaron y al igual que en los modelos de regresión, otros daños es la que menos se repite. Entre estos dos tipos de modelos los logit logran un mayor grado de predicción; para la territorial Bolívar, Caquetá, Huila, Nariño, Sucre y Tolima se tiene el mismo grado de predicción por lo que es indiferente usar un modelo u otro para predecir la Serviciabilidad de sus vías. También es importante destacar que para una misma territorial aunque el valor de los coeficientes varían de un modelo a otro, los R^2 y los PR ($<chi^2$) resultaron ser muy similares.

Los modelos logit y probit son de gran importancia para este estudio, ya que permiten dejar a un lado la subjetividad y darle una calificación a una vía a partir de parámetros cuantificables. Estos modelos también permiten evaluar la probabilidad de que un Administrador Vial evalúe una vía categoría específica basado en ciertos daños del pavimento.

Por otro lado, la variabilidad que se presenta entre los dos criterios de evaluación estudiados en esta investigación se atribuye en gran medida a que el Criterio Visual está basado en la transitabilidad y el Criterio Técnico incluye parámetros que no necesariamente le apuntan al estado funcional de las vías, de aquí la importancia de los nuevos modelos desarrollados los cuales si predicen la transitabilidad basándose en la condición de cada uno de los daños significativos para cada territorial. Con estos nuevos modelos de serviciabilidad, será posible tener una predicción más exacta del estado de las carreteras a cargo del INVIAS, al mismo tiempo que se ahorra tiempo y dinero ya que las mediciones realizadas en campo serán referidas solo a los daños definidos en los modelos de cada territorial y no a dieciséis como se hacía anteriormente. A su vez el Instituto Nacional de Vías tendrá bases confiables para tomar decisiones a la hora de llevar a cabo proyectos en materia de construcción, mantenimiento, rehabilitación y la conservación de vías, teniendo como prioridad que los daños que resultaron significativos para cada territorial son los que mayor y mejor intervención deberán tener.

De esta investigación también se puede concluir que los modelos de respuesta discreta son la herramienta estadística apropiada para modelizar el comportamiento de una variable dependiente (respuesta) de naturaleza discreta



como lo es el Criterio Visual a partir de un conjunto de variables independientes (predictoras) de naturaleza continua como el Criterio Técnico, por tanto los modelos ideales para determinar los modelos de Serviabilidad de las diferentes territoriales son el lineal, el logit ordinal y el probit ordinal.

Finalmente se puede decir que el hecho de que para una misma categoría del Criterio Visual se pueda observar un rango amplio de valores para el Criterio Técnico, hace notar la necesidad de unificar el criterio de evaluación de los Administradores Viales por medio de capacitaciones que les den una visión más objetiva y uniforme al momento de evaluar el estado de las vías del país.

6 ANEXOS

6.1 PASO A PASO MODELOS DE REGRESIÓN LINEAL

A continuación se muestra a detalle los resultados obtenidos de cada uno de los modelos de regresión lineal:

Tabla 48. Paso a paso modelo de regresión lineal territorial Antioquia

Paso	1	2	3
Constante	3.078	3.077	3.082
Baches	-5.3	-5.3	-5.2
Valor P	0.000	0.000	0.000
Fisuras	-1.78	-1.85	-1.85
Valor P	0.042	0.033	0.034
Deformaciones	-10.4	-10.2	-9.9
Valor P	0.000	0.000	0.000
Desprendimiento	-14.2	-15.4	
Valor P	0.142	0.107	
Ahuellamiento	-0.095	-0.098	-0.105
Valor P	0.000	0.000	0.000
Otros Daños	-0.8		
Valor P	0.440		
S	0.491	0.49	0.493
R-cuad.	52.06	51.88	51.08
R-cuad.(ajustado)	50.23	50.35	49.84
Cp de Mallows	7	5.6	6.2
PRESS	43.8649	43.4974	43.2332
R-cuad. (pred)	44.46	44.92	45.26

Tabla 49. Paso a paso modelo de regresión lineal territorial Bolívar

Paso	1	2	3	4
Constante	2.88	2.88	2.878	2.87
Baches	-9.2	-9.3	-9.3	-9.2
Valor P	0.000	0.000	0.000	0.000
Fisuras	-3.3	-3.2	-3.3	-3.6
Valor P	0.005	0.005	0.004	0.001
Deformaciones	-8.8	-8.9	-8.9	-9.8
Valor P	0.000	0.000	0.000	0.000
Desprendimiento	-0.92	-0.95	-1.04	
Valor P	0.309	0.288	0.245	
Ahuellamiento	-0.002			
Valor P	0.807			
Otros Daños	-2.2	-2.1		
Valor P	0.404	0.412		
S	0.555	0.554	0.554	0.554
R-cuad.	29.81	29.8	29.62	29.28
R-cuad.(ajustado)	28.28	28.52	28.61	28.52
Cp de Mallows	7	5.1	3.7	3.1

PRESS	94.724	93.3849	93.1505	92.2758
R-cuad. (pred)	21.600	22.71	22.910	23.630

Tabla 50. Paso a paso modelo de regresión lineal territorial Boyacá

Paso	1	2	3	4
Constante	2.929	2.93	2.932	2.907
Baches	-3.71	-3.7	-4	-3.85
Valor P	0.000	0.000	0.000	0.000
Fisuras	-0.54	-0.55	-0.66	
Valor P	0.225	0.172	0.095	
Deformaciones	-0.1			
Valor P	0.947			
Desprendimiento	-1.7	-1.9		
Valor P	0.597	0.29		
Ahuellamiento	-0.0256	-0.0256	-0.0254	-0.0262
Valor P	0.000	0.000	0.000	0.000
Otros Daños	-9.9	-10	-9.7	-10.9
Valor P	0	0	0	0
S	0.589	0.588	0.589	0.59
R-cuad.	38.18	38.18	37.94	37.33
R-cuad.(ajustado)	36.88	37.1	37.07	36.68
Cp de Mallows	7	5	4.1	4.9
PRESS	103.24	102.612	102.855	103.153
R-cuad. (pred)	35.780	36.17	36.020	35.830

Tabla 51. Paso a paso modelo de regresión lineal territorial Caquetá

Paso	1	2
Constante	2.91	2.911
Baches	-4.09	-4.15
Valor P	0.000	0.000
Fisuras	-1.08	-1.08
Valor P	0.000	0.000
Deformaciones	-2.4	-2.37
Valor P	0.002	0.002
Desprendimiento	-4.15	-4.26
Valor P	0.000	0.000
Ahuellamiento	-0.0336	-0.0335
Valor P	0.000	0.000
Otros Daños	-6	
Valor P	0.698	
S	0.487	0.485
R-cuad.	54.96	54.92
R-cuad.(ajustado)	53.3	53.54
Cp de Mallows	7	5.2
PRESS	42.1847	42.0656
R-cuad. (pred)	50.780	50.92

Tabla 52. Paso a paso modelo de regresión lineal territorial Caquetá

Tabla 53. Paso a paso modelo de regresión lineal territorial Caquetá

Paso	1	2	3
Constante	2.988	2.96	2.939
Baches	-2.6	-2.9	-3.7
Valor P	0.025	0.012	0.000
Fisuras	-0.49		
Valor P	0.205		
Deformaciones	-2.2	-2.4	
Valor P	0.118	0.09	
Desprendimiento	-3.67	-3.58	-3.66
Valor P	0.000	0.000	0.000
Ahuellamiento	-0.0615	-0.0599	-0.0595
Valor P	0.000	0.000	0.000
Otros Daños	-3.5	-3.7	-3.7
Valor P	0.003	0.001	0.001
S	0.385	0.385	0.387
R-cuad.	58.12	57.82	57.28
R-cuad.(ajustado)	57.01	56.9	56.54
Cp de Mallows	7	6.6	7.5
PRESS	38.5865	37.7275	37.8445
R-cuad. (pred)	51.860	52.93	52.790

Tabla 54. Paso a paso modelo de regresión lineal territorial Casanare

Paso	1	2	3
Constante	2.988	2.96	2.939
Baches	-2.6	-2.9	-3.7
Valor P	0.025	0.012	0.000
Fisuras	-0.49		
Valor P	0.205		
Deformaciones	-2.2	-2.4	
Valor P	0.118	0.09	
Desprendimiento	-3.67	-3.58	-3.66
Valor P	0.000	0.000	0.000
Ahuellamiento	-0.0615	-0.0599	-0.0595
Valor P	0.000	0.000	0.000
Otros Daños	-3.5	-3.7	-3.7
Valor P	0.003	0.001	0.001
S	0.385	0.385	0.387
R-cuad.	58.12	57.82	57.28
R-cuad.(ajustado)	57.01	56.9	56.54
Cp de Mallows	7	6.6	7.5
PRESS	38.5865	37.7275	37.8445
R-cuad. (pred)	51.860	52.93	52.790

Tabla 55. Paso a paso modelo de regresión lineal territorial Cauca

Paso	1	2	3	4
Constante	2.966	2.966	2.966	2.965
Baches	-6.68	-6.78	-6.84	-6.75
Valor P	0.000	0.000	0.000	0.000
Fisuras	-4.5	-4.51	-4.56	-5.13
Valor P	0.000	0.000	0.000	0.000
Deformaciones	-0.3			
Valor P	0.939			
Desprendimientos	-0.9	-0.9		
Valor P	0.702	0.697		
Ahuellamiento	-0.153	-0.153	-0.161	-0.144
Valor P	0.025	0.022	0.011	0.017
Otros Daños	-14	-14	-13	
Valor P	0.325	0.314	0.341	
S	0.2	0.197	0.194	0.194
R-cuad.	92.34	92.34	92.3	92.05
R-cuad.(ajustado)	90.7	91.01	91.27	91.29
Cp de Mallows	7	5	3.2	2
PRESS	5.76054	2.48025	1.9793	1.60961
R-cuad. (pred)	60.77	83.11	86.52	89.04

Tabla 56. Paso a paso modelo de regresión lineal territorial César

Paso	1	2	3	4
Constante	2.855	2.855	2.852	2.849
Baches	-2.9	-2.91	-2.93	-2.93
Valor P	0.000	0.000	0.000	0.000
Fisuras	-3.7	-3.75	-3.77	-3.76
Valor P	0.000	0.000	0.000	0.000
Deformaciones	-4.2	-4.2	-4.2	-4.2
Valor P	0	0	0	0
Desprendimientos	-0.64	-0.63		
Valor P	0.263	0.269		
Ahuellamiento	-0.41	-0.41	-0.43	
Valor P	0.077	0.076	0.068	
Otros Daños	-0.29			
Valor P	0.701			
S	0.465	0.464	0.465	0.466
R-cuad.	53.54	53.52	53.36	52.93
R-cuad.(ajustado)	52.77	52.88	52.85	52.55
Cp de Mallows	7	5.1	4.4	5.7
PRESS	*	*	*	121.276
R-cuad. (pred)	*	*	*	28.410

Tabla 57. Paso a paso modelo de regresión lineal territorial Chocó

Paso	1	2	3
Constante	2.883	2.884	2.871
Baches	-0.4		
Valor P	0.840		
Fisuras	-2.7	-2.6	
Valor P	0.128	0.129	
Deformaciones	-13.4	-13.8	-12.2
Valor P	0.012	0.006	0.012
Desprendimiento	-1.25	-1.5	-2.24
Valor P	0.421	0.097	0.004
Ahuellamiento	-0.0236	-0.0238	-0.0329
Valor P	0.026	0.023	0.000
Otros Daños	-5.4	-5.4	-5.7
Valor P	0.002	0.002	0.001
S	0.326	0.325	0.327
R-cuad.	62.9	62.89	62.04
R-cuad.(ajustado)	60.72	61.09	60.58
Cp de Mallows	7	5	5.4
PRESS	86.7002	55.3686	55.781

Tabla 58. Paso a paso modelo de regresión lineal territorial Cundinamarca

Paso	1	2	3	4
Constante	2.743	2.736	2.73	2.708
Baches	-12.9	-13	-12.9	-13.3
Valor P	0.000	0.000	0.000	0.000
Fisuras	-1.7	-1.8	-2.1	
Valor P	0.311	0.276	0.196	
Deformaciones	-1.33	-1.35	-1.32	-1.44
Valor P	0.000	0.000	0.000	0.000
Desprendimiento	-4.9			
Valor P	0.482			
Ahuellamiento	-0.0047	-0.0045		
Valor P	0.412	0.436		
Otros Daños	-13.4	-13.2	-13.1	-12.8
Valor P	0.000	0.000	0.000	0.000
S	0.429	0.427	0.426	0.428
R-cuad.	63.19	62.96	62.66	61.86
R-cuad.(ajustado)	60.33	60.58	60.77	60.43
Cp de Mallows	7	5.5	4.1	3.8
PRESS	15.9743	15.9221	15.8812	15.9241
R-cuad. (pred)	58.420	58.55	58.660	58.550

Tabla 59. Paso a paso modelo de regresión lineal territorial Huila

Paso	1	2
Constante	2.912	2.908
Baches	-2.33	-2.28
Valor P	0.008	0.010
Fisuras	-1.79	-1.8
Valor P	0.000	0.000
Deformaciones	-4.71	-4.88
Valor P	0.000	0.000
Desprendimiento	-1.19	-1.23
Valor P	0.001	0.001
Ahuellamiento	-0.0491	-0.0492
Valor P	0.000	0.000
Otros Daños	-0.66	
Valor P	0.336	
S	0.441	0.441
R-cuad.	26.56	26.43
R-cuad.(ajustado)	25.69	25.7
Cp de Mallows	7	5.9
PRESS	103.097	102.764
R-cuad. (pred)	23.170	23.42

Tabla 60. Paso a paso modelo de regresión lineal territorial Nariño

Paso	1	2	3
Constante	2.901	2.895	2.889
Baches	-3.11	-3.6	-3.58
Valor P	0.001	0.000	0.000
Fisuras	-0.99	-0.98	-0.95
Valor P	0.002	0.002	0.003
Deformaciones	-0.67		
Valor P	0.219		
Desprendimiento	-14.2	-14.9	-15.4
Valor P	0.000	0.000	0.000
Ahuellamiento	-0.0403	-0.0392	-0.0399
Valor P	0.000	0.000	0.000
Otros Daños	-4.7	-4.1	
Valor P	0.122	0.174	
S	0.433	0.434	0.435
R-cuad.	76.94	76.74	76.49
R-cuad.(ajustado)	76.15	76.08	75.96
Cp de Mallows	7	6.5	6.4
PRESS	37.4694	36.6539	36.2064
R-cuad. (pred)	73.680	74.260	74.570

Tabla 61. Paso a paso modelo de regresión lineal territorial Santander

Paso	1	2	3
Constante	2.808	2.804	2.801
Baches	-12.7	-12.6	-12.6
Valor P	0.000	0.000	0.000
Fisuras	-0.89	-0.89	-0.98
Valor P	0.003	0.004	0.001
Deformaciones	-1.68	-1.78	-1.81
Valor P	0.016	0.010	0.008
Desprendimientos	-1.9	-1.8	
Valor P	0.124	0.138	
Ahuellamiento	-0.0165	0.0171	-0.017
Valor P	0.000	0.000	0.000
Otros Daños	-0.8		
Valor P	0.391		
S	0.605	0.605	0.606
R-cuad.	35.65	35.52	35.12
R-cuad.(ajustado)	34.57	34.62	34.4
Cp de Mallows	7	5.7	5.9
PRESS	138.379	137.43	136.753
R-cuad. (pred)	32.120	32.59	32.920

Tabla 62. Paso a paso modelo de regresión lineal territorial Sucre

Paso	1	2	3	4	5
Constante	2.768	2.767	2.765	2.768	2.762
Baches	-1.2	-1.3	-1.6	-1.5	
Valor P	0.507	0.388	0.198	0.232	
Fisuras	-2.53	-2.54	-2.55	-2.66	-2.81
Valor P	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Deformaciones	-0.9	-0.9			
Valor P	0.716	0.716			
Desprendimiento	-1.81	-1.81	-1.84	-1.86	-1.81
Valor P	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Ahuellamiento	-0.042	-0.042	-0.04		
Valor P	0.328	0.324	0.341		
Otros Daños	-0.1				
Valor P	0.953				
S	0.519	0.515	0.512	0.511	0.513
R-cuad.	66.35	66.35	66.28	65.82	65.08
R-cuad.(ajustado)	63.24	63.8	64.27	64.31	64.07
Cp de Mallows	7	5	3.1	2	1.4
PRESS	25.7994	22.7042	21.7192	19.9011	19.4922
R-cuad. (pred)	50.390	56.340	58.230	61.730	62.510

Tabla 63. Paso a paso modelo de regresión lineal territorial Tolima

Paso	1	2
Constante	2.509	2.5
Baches	-2.45	-2.5
Valor P	0.000	0.000
Fisuras	-2.79	-2.73
Valor P	0.000	0.000
Deformaciones	-0.66	-0.65
Valor P	0.013	0.016
Desprendimiento	-1.76	-1.86
Valor P	0.012	0.009
Ahuellamiento	-0.047	-0.046
Valor P	0.002	0.002
Otros Daños	-13.1	
Valor P	0.069	
S	0.497	0.502
R-cuad.	50.12	48.91
R-cuad.(ajustado)	47.97	47.09
Cp de Mallows	7	8.4
PRESS	37.815	38.0173
R-cuad. (pred)	45.150	44.85

Tabla 64. Paso a paso modelo de regresión lineal territorial Valle

Paso	1	2	3
Constante	2.935	2.929	2.918
Baches	-7.45	-7.47	-7.56
Valor P	0.000	0.000	0.000
Fisuras	-0.22		
Valor P	0.597		
Deformaciones	-1.5	-1.4	
Valor P	0.240	0.250	
Desprendimiento	-0.781	-0.779	-0.799
Valor P	0.000	0.000	0.000
Ahuellamiento	-0.0212	-0.0214	-0.0197
Valor P	0.001	0.001	0.001
Otros Daños	-4.2	-4.4	-4.4
Valor P	0.026	0.018	0.020
S	0.359	0.358	0.358
R-cuad.	74.05	74.02	73.88
R-cuad.(ajustado)	73.4	73.48	73.45
Cp de Mallows	7	5.3	4.6
PRESS	58191.7	59417.8	57719.7
R-cuad. (pred)	0.000	0.000	0.000

Tabla 65. Paso a paso modelo de regresión lineal Colombia

Paso	1
Constante	2.84
Baches	-4.74
Valor P	0.000
Fisuras	-1.623
Valor P	0.000
Deformaciones	-1.98
Valor P	0.000
Desprendimiento	-0.802
Valor P	0.000
Ahuellamiento	-0.0233
Valor P	0.000
Otros Daños	-2.26
Valor P	0.000
S	0.537
R-cuad.	42.96
R-cuad.(ajustado)	42.86
Cp de Mallows	7
PRESS	945.189
R-cuad. (pred)	42.620

6.2 CÓDIGO UTILIZADO PARA ESTIMAR LOS MODELOS LOGIT Y PROBIT CON EL SOFTWARE R PROJECT

A continuación se muestra el código utilizado en el software R Project para estimar los modelos logit y probit:

```
# Ordered Probit and Logit Models in R
# Copyright 2013 by Ani Katchova

# install.packages("rms")
library(rms)

mydata<- read.csv("C:/Users/proyecto/Desktop/R/SANTANDER.csv")
attach(mydata)

Y <- cbind(respuesta)
X <- cbind(baches, fisuras, deformaciones, desprendimientos, ahuellamiento,
otrosdaños)
Xvar <- c("baches", "fisuras", "deformaciones", "desprendimientos",
"ahuellamiento", "otrosdaños")
ologit<- lrm(Y ~ X, data=mydata)
print(ologit)

# Ordered logit model odds ratio
```

```
# summary(ologit)

# Ordered logit predicted probabilities
# xmeans <- colMeans(X)
# newdata1 <- data.frame(t(xmeans))
fitted <- predict(ologit, newdata=mydata, type="fitted.ind")
colMeans(fitted)

# Para estimar el Probit ordinal
orprobit<- orm(Y ~ X, family=probit, x=TRUE, y=TRUE)
print(orprobit)
fitted <- predict(orprobit, newdata=mydata, type="fitted.ind")
colMeans(fitted)
```

6.3 PASO A PASO MODELOS LOGIT ORDINAL

A continuación se muestra a detalle los resultados obtenidos de cada uno de los modelos logit ordinal:

Tabla 66. Modelo logit ordinal territorial Antioquia

Parámetro	Coefficiente	S.E	Wald test
τ_1	-6.0466	0.7296	-8.29
τ_2	-2.9549	0.4731	-6.25
Baches	-28.6487	8.8371	-3.24
Fisuras	-6.7548	4.0827	-1.65
Deformaciones	-51.0451	15.8055	-3.23
Ahuellamiento	-0.4735	0.0941	-5.03
		LR chi2	103.46
		Pr(> chi2)	0.0001
		R2	0.558

Tabla 67. Modelo logit ordinal territorial Bolívar

Parámetro	Coefficiente	S.E	Wald test
τ_1	-3.3416	0.299	-11.18
τ_2	-1.8086	0.1964	-9.21
Baches	-33.3275	8.0231	-4.15
Fisuras	-11.089	4.3047	-2.58
Deformaciones	-30.6697	8.2031	-3.74
		LR chi2	64.39
		Pr(> chi2)	< 0.0001
		R2	0.264

Tabla 68. Modelo logit ordinal territorial Boyacá

Parámetro	Coefficiente	S.E	Wald test
τ_1	-5.1557	0.4713	-10.94
τ_2	-2.3129	0.368	-6.29
Baches	-18.1713	4.5463	-4
Deformaciones	-22.0069	4.769	-4.61
Ahuellamiento	-0.1086	0.0167	-6.51
Otros Daños	-30.2278	9.8888	-3.06
		LR chi2	173.53
		Pr(> chi2)	< 0.0001
		R2	0.51

Tabla 69. Modelo logit ordinal territorial Caquetá

Parámetro	Coefficiente	S.E	Wald test
τ_1	-6.0255	0.6608	-9.12
τ_2	-2.1072	0.343	-6.14
Baches	-19.3979	4.4904	-4.32
Fisuras	-4.9907	1.2985	-3.84
Deformaciones	-10.2736	3.633	-2.83
Desprendimientos	-16.4737	4.8287	-3.41
Ahuellamiento	-0.1913	0.0378	-5.06
		LR chi2	131.78
		Pr(> chi2)	< 0.0001
		R2	0.622

Tabla 70. Modelo logit ordinal territorial Cesar

Parámetro	Coefficiente	S.E	Wald test
τ_1	-3.9184	0.3117	-12.57
τ_2	-1.8822	0.1656	-11.36
Baches	-9.3477	2.0654	-4.53
Fisuras	-14.7706	1.7341	-8.52
		LR chi2	176.57
		Pr(> chi2)	< 0.0001
		R2	0.483

Tabla 71. Modelo logit ordinal territorial Cundinamarca

Parámetro	Coficiente	S.E	Wald test
τ_1	-7.1094	1.2076	-5.89
τ_2	-1.2312	0.4247	-2.9
Baches	-87.6347	31.6529	-2.77
Deformaciones	-8.1187	1.9234	-4.22
Otros Daños	-88.3801	26.9863	-3.27
		LR chi2	81.7
		Pr(> chi2)	< 0.0001
		R2	0.718

Tabla 72. Modelo logit ordinal territorial Huila

Parámetro	Coficiente	S.E	Wald test
τ_1	-5.8918	0.4705	-12.52
τ_2	-2.0572	0.1812	-11.36
Baches	-8.1442	4.4785	-1.82
Fisuras	-9.1561	1.5582	-5.88
Deformaciones	-20.6374	4.8171	-4.28
Desprendimientos	-6.0796	1.7147	-3.55
Ahuellamiento	-0.2684	0.0509	-5.27
		LR chi2	128.37
		Pr(> chi2)	< 0.0001
		R2	0.761

Tabla 73. Modelo logit ordinal territorial Nariño

Parámetro	Coficiente	S.E	Wald test
τ_1	7.0534	0.8842	7.98
τ_2	3.6555	0.5225	7.00
Fisuras	-8.7871	2.0276	-4.33
Deformaciones	-18.3193	8.6388	-2.12
Desprendimientos	-38.4483	5.9485	-6.46
Ahuellamiento	-0.0953	0.0358	-2.66

Tabla 74. Modelo logit ordinal territorial Santander

Parámetro	Coficiente	S.E	Wald test
τ_1	-3.4785	0.283	-12.29
τ_2	-1.5226	0.1948	-7.81
Baches	-61.2604	8.9359	-6.86
Fisuras	-3.4586	1.0157	-3.41
Deformaciones	-5.5082	2.297	-2.4
Ahuellamiento	-0.0441	0.0141	-3.14
		LR chi2	147.93
		Pr(> chi2)	< 0.0001
		R2	0.758

Tabla 75. Modelo logit ordinal territorial Sucre

Parámetro	Coefficiente	S.E	Wald test
τ_1	-4.3885	0.7458	-5.88
τ_2	-1.6438	0.4669	-3.52
Fisuras	-11.5865	2.4528	-4.72
Desprendimientos	-7.4386	1.6614	-4.48
	LR chi2		69.72
	Pr(> chi2)		< 0.0001
	R2		0.699

Tabla 76. Modelo logit ordinal territorial Tolima

Parámetro	Coefficiente	S.E	Wald test
τ_1	-4.3361	0.5436	-7.98
τ_2	-0.3878	0.284	-1.37
Baches	-18.6869	4.4898	-4.16
Fisuras	-12.5874	2.5199	-5
Deformaciones	-3.0896	1.1886	-2.6
Desprendimientos	-7.6289	3.0888	-2.47
	LR chi2		97.75
	Pr(> chi2)		< 0.0001
	R2		0.561

Tabla 77. Modelo logit ordinal territorial Valle

Parámetro	Coefficiente	S.E	Wald test
τ_1	-6.1852	0.5554	-11.14
τ_2	-1.9718	0.2967	-6.64
Deformaciones	-15.2006	7.6643	-1.98
Desprendimientos	-4.2642	0.7031	-6.07
Ahuellamiento	-0.0803	0.0417	-1.93
	LR chi2		195.82
	Pr(> chi2)		< 0.0001
	R2		0.629

Tabla 78. Modelo logit ordinal territorial Colombia

Parámetro	Coefficiente	S.E	Wald test
τ_1	-4.288	0.1062	-40.37
τ_2	-1.6853	0.0602	-27.98
Baches	-23.2414	1.3321	-17.45
Fisuras	-5.8229	0.4182	-13.92
Deformaciones	-6.7448	0.5166	-13.06
Desprendimientos	-2.5767	0.1952	-13.2
Ahuellamiento	-0.0843	0.0049	-17.05
Otros Daños	-9.3836	1.5187	-6.18
	LR chi2		1652.97
	Pr(> chi2)		< 0.0001
	R2		0.468

6.4 PASO A PASO MODELOS PROBIT ORDINAL

Tabla 79. Modelo probit ordinal territorial Antioquia

Parámetro	Coeficiente	S.E	Wald test
τ_1	-3.433	0.3704	-9.27
τ_2	-1.724	0.2524	-6.83
Baches	-17.931	5.1311	-3.49
Fisuras	-3.5715	2.3734	-1.5
Deformaciones	-24.3444	6.4812	-3.76
Ahuellamiento	-0.2747	0.0527	-5.22
	LR chi2	104.25	
	Pr(> chi2)	< 0.0001	
	R2	0.561	

Tabla 80. Modelo probit ordinal territorial Bolívar

Parámetro	Coeficiente	S.E	Wald test
τ_1	-1.9234	0.1495	-12.87
τ_2	-1.0895	0.1082	-10.07
Baches	-15.1969	3.6426	-4.17
Fisuras	-6.6044	2.5185	-2.62
Deformaciones	-19.0694	4.8356	-3.94
	LR chi2	65.57	
	Pr(> chi2)	< 0.0001	
	R2	0.268	

Tabla 81. Modelo probit ordinal territorial Boyacá

Parámetro	Coeficiente	S.E	Wald test
τ_1	-3.0475	0.2546	-11.97
τ_2	-1.3961	0.2063	-6.77
Baches	-8.7816	2.0948	-4.19
Deformaciones	-12.7467	2.6308	-4.85
Ahuellamiento	-0.0652	0.0094	-6.91
Otros Daños	-19.2845	6.054	-3.19
	LR chi2	174.82	
	Pr(> chi2)	< 0.0001	
	R2	0.513	

Tabla 82. Modelo probit ordinal territorial Caquetá

Parámetro	Coficiente	S.E	Wald test
τ_1	-3.2447	0.3067	-10.58
τ_2	-1.1634	0.1868	-6.23
Baches	-9.8981	2.4534	-4.03
Fisuras	-2.6875	0.7017	-3.83
Deformaciones	-5.8371	2.0232	-2.89
Desprendimientos	-9.9262	2.6696	-3.72
Ahuellamiento	-0.102	0.0191	-5.34
	LR chi2	127.54	
	Pr(> chi2)	< 0.0001	
	R2	0.609	

Tabla 83. Modelo probit ordinal territorial Cesar

Parámetro	Coficiente	S.E	Wald test
τ_1	-2.1767	0.146	-14.9
τ_2	-1.1193	0.0903	-12.39
Baches	-5.6046	1.1074	-5.06
Fisuras	-8.0928	0.858	-9.43
	LR chi2	176.41	
	Pr(> chi2)	< 0.0001	
	R2	0.483	

Tabla 84. Modelo probit ordinal territorial Cundinamarca

Parámetro	Coficiente	S.E	Wald test
τ_1	-3.7368	0.552	-6.77
τ_2	-0.6505	0.2446	-2.66
Baches	-42.7688	15.7058	-2.72
Deformaciones	-4.4194	0.9939	-4.45
Otros Daños	-48.3714	14.7276	-3.28
	LR chi2	79.72	
	Pr(> chi2)	< 0.0001	
	R2	0.708	

Tabla 85. Modelo probit ordinal territorial Huila

Parámetro	Coficiente	S.E	Wald test
τ_1	-3.1607	0.2084	-15.17
τ_2	-1.2189	0.1	-12.19
Baches	-4.8197	2.3895	-2.02
Fisuras	-5.3961	0.9098	-5.93
Deformaciones	-11.2622	2.6479	-4.25
Desprendimientos	-3.352	0.9967	-3.36
Ahuellamiento	-0.1469	0.0285	-5.15
	LR chi2	128.39	
	Pr(> chi2)	< 0.0001	
	R2	0.297	

Tabla 86. Modelo probit ordinal territorial Nariño

Parámetro	Coeficiente	S.E	Wald test
τ_1	-3.8499	0.4143	-9.29
τ_2	-2.0711	0.2631	-7.87
Fisuras	-5.0634	1.1293	-4.48
Deformaciones	-11.8583	4.4441	-2.67
Desprendimientos	-21.4185	3.0719	-6.97
Ahuellamiento	-0.0498	0.0197	-2.54
	LR chi2	245.16	
	Pr(> chi2)	< 0.0001	
	R2	0.862	

Tabla 87. Modelo probit ordinal territorial Santander

Parámetro	Coeficiente	S.E	Wald test
τ_1	-1.9994	0.1456	-13.73
τ_2	-0.9119	0.1129	-8.08
Baches	-36.3553	5.1709	-7.03
Fisuras	-2.0724	0.6059	-3.42
Deformaciones	-3.2036	1.3616	-2.35
Desprendimientos	-0.0247	0.0083	-2.98
	LR chi2	148.18	
	Pr(> chi2)	< 0.0001	
	R2	0.393	

Tabla 88. Modelo probit ordinal territorial Sucre

Parámetro	Coeficiente	S.E	Wald test
τ_1	-2.498	0.3807	-6.56
τ_2	-0.9752	0.2682	-3.64
Fisuras	-6.6999	1.3234	-5.06
Desprendimientos	-4.2738	0.8741	-4.89
	LR chi2	69.67	
	Pr(> chi2)	< 0.0001	
	R2	0.699	

Tabla 89. Modelo probit ordinal territorial Tolima

Parámetro	Coeficiente	S.E	Wald test
τ_1	-2.3103	0.2522	-9.16
τ_2	-0.1338	0.1663	-0.8
Baches	-8.7902	2.0287	-4.33
Fisuras	-6.6218	1.3082	-5.06
Deformaciones	-1.5889	0.6553	-2.42
Desprendimientos	-4.3657	1.7983	-2.43
	LR chi2	94.18	
	Pr(> chi2)	< 0.0001	
	R2	0.547	

Tabla 90. Modelo probit ordinal territorial Valle

Parámetro	Coficiente	S.E	Wald test
τ_1	-3.3528	0.2561	-13.09
τ_2	-1.157	0.1662	-6.96
Deformaciones	-8.9951	4.7019	-1.91
Desprendimientos	-2.0444	0.313	-6.53
Ahuellamiento	-0.0644	0.0211	-3.06
	LR chi2	187.97	
	Pr(> chi2)	< 0.0001	
	R2	0.612	

Tabla 91. Modelo probit ordinal territorial Colombia

Parámetro	Coficiente	S.E	Wald test
τ_1	-2.4083	0.0519	-46.43
τ_2	-0.9924	0.034	-29.2
Baches	-11.5504	0.6163	-18.74
Fisuras	-3.471	0.2341	-14.83
Deformaciones	-3.982	0.2996	-13.29
Desprendimientos	-1.5315	0.1149	-13.33
Ahuellamiento	-0.0477	0.0027	-17.37
Otros Daños	-5.4138	0.8856	-6.11
	LR chi2	1618.3	
	Pr(> chi2)	< 0.0001	
	R2	0.461	

7 BIBLIOGRAFÍA

- Al-Omari, B. & Darter, M.I. (1994). Relationships between international roughness index and present serviceability rating. Transportation Research Record No. 1435. p. 130-136. Washington, D. C.
- AASHO. The AASHO Road Test; American Association of State Highway Officials Report 5 Pavement Research. Highway Research Board, 1962.
- ASTM. 2009b. Standard practice for computing international roughness index of roads from longitudinal profile measurements. E1926-08, West Conshohocken, Pa.
- Carey, W.N. & Irick, P. E. (1960). The pavement Serviceability. Performance Concept. Highway Research Board Bulletin N° 250. Washington, D.C.

- De Solminihac H., Salsilli R., Köhler E. & Bengoa E. (2003). Analysis of Pavement Serviceability for the AASHTO Design Method: The Chilean Case. ARABIAN JOURNAL FOR SCIENCE AND ENGINEERING Volume: 28 Issue: 2B Pages: 143-160.
- De Solminihac, H. (2005). Gestión de Infraestructura Vial. Alfaomega. Colombia
- Dujisin, D. (1995). Evaluación Técnica de Pavimentos Existentes. Cámara Chilena de la Construcción, Informe de Avance N°3, Santiago, Chile.
- Fuentes, L., Gunaratne, M. & Hess, D. (2010). Evaluation of the Effect of Pavement Roughness on Skid Resistance. ASCE Journal of Transportation Engineering. Volume 136, No 7, pp. 640-653.
- Garcia-Diaz, A. & Riggins, M. (1984). Serviceability and Distress Methodology for Predicting Pavement Performance. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No 997, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., pp. 56-61.
- Holsen, M. & Hudson, W. R. (1976). Variability of Initial Serviceability as a Pavement Design Parameter. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No 572, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., pp. 51-70.
- Huang, Y. (2003). Pavement Analysis and Design. Prentice Hall. New Jersey.
- INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS INVIAS, Subdirección de Concesiones (2002). Construcción, Rehabilitación Y Mejoramiento, Operación Y Mantenimiento Del Corredor Briceño Tunja Sogamoso. INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS INVIAS.
- Keever, D.B., Weiss K.E. & Quarles R.C. (2001). Moving Ahead: The American Public Speaks on Roadways and Transportation in Communities. Federal Highway Administration (FHWA) Report: FHWA-OP-01-017. Washington, D.C.
- Kohler, E. (1998). Diagnóstico de la Serviabilidad de Pavimentos Urbanos en Chile. Tesis de Magíster. Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago.

- Llano, L. & Mosquera, V. (2006). El Modelo Logit una alternativa para medir probabilidad de permanencia estudiantil. Tesis de Especialización. Manizales.: Universidad Nacional Sede Manizales. Facultad de Administración.
- Moore, R.K., Clark, G.N. & Plumb, G.N. (1987). Present Serviceability-Roughness Correlations Using Rating Panel Data. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No 1117, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., pp. 152-158.
- Nair S.W, Hudson, R. & Lee C.E. (1985). Realistic Pavement Serviceability Equations Using The 690D Surface Dynamics Profiler, Austin, Texas; Center for Transportation Research. The University of Texas at Austin.
- Nakamura, V.F. & Michael H.L. (1963). Serviceability Ratings of Highway Pavements. Highway Research Record 40. Highway Research Board. Washington, D.C., pp. 21-36.
- Paterson, W.D.O. (1987). Road Deterioration and Maintenance Effects: Models for Planning and Management. Highway Design and Maintenance Standards Series. World Bank transportation department, Washington, D. C.
- Prozzi, J. A. & Madanat, S. M. (2002). A nonlinear model for predicting pavement serviceability. Proceedings of the Seventh International Conference on: Applications of Advanced Technology in Transportation, August 5, 2002 - August 7, 481-488.)
- Riggins, M., Lytton, R.L. & Garcia-Diaz, A. (1985). Developing Stochastic Flexible Pavement Distress and Serviceability Equations". Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No 1048, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., pp. 1-7.
- Sayers, M. (1995). On the calculation of IRI from longitudinal road Profiles. The University of Michigan Transportation Research Institute, Transportation Research Board, Washington, D. C.
- Sayers, M., Gillespie, T. D. & Queiroz, C. (1986). International Experiment to Establish Correlations and Standard Methods for Road Roughness Measurements. World Bank Technical Paper No 45, Washington, D. C.



- Scrivner, F. (1964). A Modification of the AASHO Road Test Serviceability Index Formula. Highway Research Record. Transportation Research Board Business Office. pp 71-87.
- Shafizadeh, K., Mannering, F. & Pierce, L. (2002). A statistical analysis of Factors Associated with Driver-Perceived Road Roughness on Urban Highways. Research Report. Research Project T1803, Task 28. Highway Roughness. Research Office Washington State Department of Transportation.
- Shahin, M.Y. (2005). Pavement Management for Airports, Roads and Parking Lots. Chapman & Hall. New York.
- Soleymani, H.R., Keettikkal, T.P. & Igorevich, T.M. (2002). Serviceability evaluation of the primary highways in Alberta. Paper presented at the Proceedings, Annual Conference - Canadian Society for Civil Engineering, 2002 2713-2722. Retrieved from www.scopus.com