

**PROPUESTA DE MODIFICACIÓN DEL SOBREALCHO MÍNIMO REQUERIDO
PARA EL VEHÍCULO C3S2 EN EL DISEÑO DE VÍAS EN COLOMBIA.**



Ing. Esp. GINNA IVONNE MONTOYA SUAREZ
C.C. 1136.882.211
Email: ginnamontoya@usantotomas.edu.co

Ing. Esp. YERLY CAROLINA CÁRDENAS RODRÍGUEZ
C.C. 1018.435.185
Email: yerlycardenas@usantotomas.edu.co

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
MAESTRIA EN INFRAESTRUCTURA VIAL
BOGOTÁ
2020

**PROPUESTA DE MODIFICACIÓN DEL SOBREALCHO MÍNIMO REQUERIDO
PARA EL VEHÍCULO C3S2 EN EL DISEÑO DE VÍAS EN COLOMBIA**



Ing. Esp. GINNA IVONNE MONTOYA SUAREZ
C.C. 1136.882.211
Email: ginnamontoya@usantotomas.edu.co

Ing. Esp. YERLY CAROLINA CÁRDENAS RODRÍGUEZ
C.C. 1018.435.185
Email: yerlycardenas@usantotomas.edu.co

Proyecto de grado para optar el título de magíster en infraestructura vial

Dirigido por: ING. WILSON ERNESTO VARGAS VARGAS MSC.

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
MAESTRIA EN INFRAESTRUCTURA VIAL
BOGOTÁ
2020

CONTENIDO

1. TITULO DEL PROYECTO	14
1.1. Línea de Investigación.....	14
2. INTRODUCCIÓN.....	15
3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	17
4. JUSTIFICACIÓN.....	19
5. OBJETIVOS.....	20
5.1. Objetivo General.....	20
5.2. Objetivos Específicos	20
6. ESTADO DEL ARTE	21
7. MARCO DE REFERENCIA	25
7.1. Marco Teórico.....	25
7.2. Marco contextual.	36
8. MARCO METODOLÓGICO.....	38
8.1. Fase 1 – Recopilación y Categorización.....	40
8.2. Fase 2 – DETERMINACIÓN DEL SOBREENCHO	41
8.2.1. Determinación Teórica de Sobreancho.	41
8.2.2. Simulaciones en el Software Vehicle Tracking – Tractocamión INVIAS 2008.	41
8.2.3. Simulaciones de pruebas piloto.....	48
8.2.4. Simulaciones en el Software Vehicle Tracking – Tractocamión Actual	50
8.3. Fase 3 – ANÁLISIS DE RESULTADOS	50
9. CARACTERIZACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL CAMIÓN DE DISEÑO	51
10. CÁLCULOS Y MODELACIONES DE SOBREENCHOS	57
10.1. Cálculos Manual de Diseño Geométrico 2008	57

10.1.1.	Curva Espiral – Espiral (EE)	58
10.1.2.	Curva Espiral – Circulo – Espiral (ECE)	60
10.2.	Modelaciones Vehicle Tracking	61
10.3.	Modelaciones en prueba piloto	64
11.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	73
11.1.	Curvas Espiral - Espiral	73
11.1.1.	Nomogramas de Sobreancho en Función de la Deflexión	73
11.1.2.	Nomogramas de Sobreancho en Función de la Velocidad	79
11.1.3.	Análisis Estadístico de los Resultados	87
11.1.4.	Comparación de Metodología de prueba piloto vs Formulaciones y Modelos Computacionales	88
11.1.5.	Propuesta Calculo de Sobreancho	90
11.2.	Curvas Espiral – Circulo – Espiral	94
11.2.1.	Nomogramas de Sobreancho en Función de la Deflexión	94
11.2.2.	Nomogramas de Sobreancho en Función de la Velocidad	97
11.2.3.	Análisis Estadístico de los Resultados	105
11.2.4.	Comparación de Metodología de pruebas piloto vs Formulaciones y Modelos Computacionales	106
11.2.5.	Propuesta Calculo de Sobreancho	107
11.3.	Impacto Social	109
11.4.	Impacto Ambiental	109
12.	HERRAMIENTA ACADÉMICA	110
13.	CONCLUSIONES	113
14.	RECOMENDACIONES	116
15.	BIBLIOGRAFÍA	117
16.	ANEXOS	119

Lista de tablas

Tabla 1 Dimensiones del vehículo C3S2	27
Tabla 2 Valor de C en función del ancho de la calzada	35
Tabla 3 Dimensiones del vehículo C3S2	52
Tabla 4 Dimensiones de vehículos pruebas piloto	53
Tabla 5 Valor de Sobreancho INVIAS Curva EE – Vehículo Rígido	58
Tabla 6 Valor de Sobreancho INVIAS Curva EE – Vehículo Articulado.....	58
Tabla 7 Valor de Sobreancho INVIAS Curva ECE – Vehículo Rígido.....	60
Tabla 8 Valor de Sobreancho INVIAS Curva ECE – Vehículo Articulado	60
Tabla 9 Valor de Sobreancho Modelaciones Curva EE – Vehículo C3S2	62
Tabla 10 Valor de Sobreancho Modelaciones Curva ECE – Vehículo C3S2.....	62
Tabla 11 Diferencias Porcentuales de Sobreancho Modelaciones vs. Calculo INVIAS Vehículo Rígido – Curva EE	65
Tabla 12 Diferencias Porcentuales de Sobreancho Modelaciones vs. Calculo INVIAS Vehículo Articulado – Curva EE	65
Tabla 13 Diferencias Porcentuales de Sobreancho Modelaciones vs. Calculo INVIAS Vehículo Rígido – Curva ECE.....	66
Tabla 14 Diferencias Porcentuales de Sobreancho Modelaciones vs. Calculo INVIAS Vehículo Articulado – Curva ECE	66
Tabla 15 Valor de Sobreancho Modelaciones de las pruebas piloto Curva EE – Vehículo C3S2.....	72
Tabla 16 Resultados Análisis Estadístico – Curva EE	88
Tabla 17 Comparativo Metodologías evaluadas	89
Tabla 18 Resultados Análisis Estadístico – Curva ECE	106

Lista de figuras

<i>Figura 1.</i> Vehículo de transporte de carga extra dimensionada en Colombia.....	18
<i>Figura 2.</i> Velocidad de Diseño de un tramo homogéneo (VTR), Km/h.	26
<i>Figura 3.</i> Vehículo C3S2 dimensiones.....	27
<i>Figura 4.</i> Elementos de la Curva.....	28
<i>Figura 5.</i> Elementos de la Curva Circular	29
<i>Figura 6.</i> Geometría de la Curva Espiral –Espiral.....	30
<i>Figura 7.</i> Geometría de la Curva Espiral – Circulo - Espiral	31
<i>Figura 8.</i> Sobreancho en curvas	32
<i>Figura 9.</i> Sobreancho requerido para un vehículo articulado C3S2.....	34
<i>Figura 10.</i> Curva ejemplo espiral – espiral.....	42
<i>Figura 11</i> Alineamiento de una curva.	43
<i>Figura 12</i> Bordos y centro del Carril.	43
<i>Figura 13</i> Ajustes de vehículo al software.	44
<i>Figura 14</i> Datos de vehículos C3S2 ingresado al software Vehicle Tracking	44
<i>Figura 15</i> Datos de vehículos de Vehicle Tracking_C3S2	45
<i>Figura 16</i> Icono AutoDrive Arco.....	46
<i>Figura 17</i> Vehículo diRígido.....	46
<i>Figura 18</i> Trazado del Vehículo C3S2 ambos sentidos.	47
<i>Figura 19</i> Animación recorrido del vehículo.....	47
<i>Figura 20</i> Evaluación del Sobreancho.	48
<i>Figura 21.</i> KMZ, Localización sitio de prueba.	49
<i>Figura 22.</i> KMZ, Localización para implementación de topografía.	49
<i>Figura 23.</i> Tabla de dimensiones.....	51
<i>Figura 24.</i> Vehículo C3S2 dimensiones.....	51
<i>Figura 25.</i> Vehículos C3S2 - INVIAS	52
<i>Figura 26.</i> Vehículo C3S3 Tipo camabaja	54
<i>Figura 27.</i> Vehículo C3S3.....	54

<i>Figura 28. Vehículo C3S2 Tipo camabaja</i>	55
<i>Figura 29. Vehículo C3S2</i>	55
<i>Figura 30 Vehículo C3S2 con carga</i>	56
<i>Figura 31. Tabla 5.2 Ancho de Calzada (metros)</i>	67
<i>Figura 32. Curva Espiral – Espiral Velocidad 70 Deflexión 50</i>	68
<i>Figura 33. Curva Espiral – Circulo – Espiral Velocidad 50 Deflexión 100</i>	69
<i>Figura 34. Localización del parqueadero donde se efectuaron las pruebas piloto</i> .69	
<i>Figura 35. Replanteo curvar seleccionadas pruebas piloto</i>	70
<i>Figura 36. Huella marcada por el paso del vehículo seleccionado</i>	71
<i>Figura 37. Cálculo para vehículos rígidos del Manual de Diseño de 2008 -Curva EE</i>	74
<i>Figura 38. Cálculo para vehículos articulados del Manual de Diseño de 2008 – Curva EE</i>	74
<i>Figura 39. Modelaciones realizadas a través del Software Vehicle Tracking – Curva EE</i>	75
<i>Figura 40. Nomograma comparación de métodos velocidad de 40km/h – Curva EE</i>	76
<i>Figura 41. Nomograma comparación de métodos velocidad de 50km/h – Curva EE</i>	76
<i>Figura 42. Nomograma comparación de métodos velocidad de 60km/h – Curva EE</i>	77
<i>Figura 43. Nomograma comparación de métodos velocidad de 70km/h – Curva EE</i>	77
<i>Figura 44. Nomograma comparación de métodos velocidad de 80km/h – Curva EE</i>	78
<i>Figura 45. Nomograma comparación de métodos velocidad de 90km/h – Curva EE</i>	78
<i>Figura 46. Nomograma comparación de métodos velocidad de 100km/h – Curva EE</i>	79

<i>Figura 47. Cálculo para vehículos rígidos del Manual de Diseño de 2008 – Curva EE</i>	<i>80</i>
<i>Figura 48. Cálculo para vehículos articulados del Manual de Diseño de 2008 – Curva EE</i>	<i>80</i>
<i>Figura 49. Modelaciones realizadas a través del Software Vehicle Tracking – Curva EE</i>	<i>81</i>
<i>Figura 50. Nomograma comparación de métodos deflexión de 20° - Curva EE</i>	<i>82</i>
<i>Figura 51. Nomograma comparación de métodos deflexión de 30° - Curva EE</i>	<i>82</i>
<i>Figura 52. Nomograma comparación de métodos deflexión de 40° - Curva EE</i>	<i>83</i>
<i>Figura 53. Nomograma comparación de métodos deflexión de 50° - Curva EE</i>	<i>83</i>
<i>Figura 54. Nomograma comparación de métodos deflexión de 60° - Curva EE</i>	<i>84</i>
<i>Figura 55. Nomograma comparación de métodos deflexión de 70° - Curva EE</i>	<i>84</i>
<i>Figura 56. Nomograma comparación de métodos deflexión de 80° - Curva EE</i>	<i>85</i>
<i>Figura 57. Nomograma comparación de métodos deflexión de 90° - Curva EE</i>	<i>85</i>
<i>Figura 58. Nomograma comparación de métodos deflexión de 100° - Curva EE ..</i>	<i>86</i>
<i>Figura 59. Nomograma comparación de métodos deflexión de 110° - Curva EE ..</i>	<i>86</i>
<i>Figura 60. Nomograma comparación de métodos deflexión de 120° - Curva EE ..</i>	<i>87</i>
<i>Figura 61. Nomograma sobreancho según modelaciones – Curva EE y V=40km/h</i>	<i>90</i>
<i>Figura 62. Nomograma sobreancho según modelaciones – Curva EE y V=50km/h</i>	<i>91</i>
<i>Figura 63. Nomograma sobreancho según modelaciones – Curva EE y V=60km/h</i>	<i>91</i>
<i>Figura 64. Nomograma sobreancho según modelaciones – Curva EE y V=70km/h</i>	<i>92</i>
<i>Figura 65. Nomograma sobreancho según modelaciones – Curva EE y V=80km/h</i>	<i>92</i>
<i>Figura 66. Nomograma sobreancho según modelaciones – Curva EE y V=90km/h</i>	<i>93</i>

<i>Figura 67. Nomograma sobreancho según modelaciones – Curva EE y V=100km/h</i>	93
<i>Figura 68. Cálculo para vehículos rígidos del Manual de Diseño de 2008 – Curva ECE</i>	94
<i>Figura 69. Cálculo para vehículos articulados del Manual de Diseño de 2008 – Curva ECE</i>	95
<i>Figura 70. Modelaciones realizadas a través del Software Vehicle Tracking – Curva ECE</i>	95
<i>Figura 71. Nomograma comparación de métodos velocidad de 40km/h – Curva ECE</i>	96
<i>Figura 72. Nomograma comparación de métodos velocidad de 50km/h – Curva ECE</i>	97
<i>Figura 73. Cálculo para vehículos rígidos del Manual de Diseño de 2008 – Curva ECE</i>	98
<i>Figura 74. Cálculo para vehículos articulados del Manual de Diseño de 2008 – Curva ECE</i>	98
<i>Figura 75. Modelaciones realizadas a través del Software Vehicle Tracking – Curva ECE</i>	99
<i>Figura 76. Nomograma comparación de métodos deflexión de 20° - Curva ECE100</i>	
<i>Figura 77. Nomograma comparación de métodos deflexión de 30° - Curva ECE100</i>	
<i>Figura 78. Nomograma comparación de métodos deflexión de 40° - Curva ECE101</i>	
<i>Figura 79. Nomograma comparación de métodos deflexión de 50° - Curva ECE101</i>	
<i>Figura 80. Nomograma comparación de métodos deflexión de 60° - Curva ECE102</i>	
<i>Figura 81. Nomograma comparación de métodos deflexión de 70° - Curva ECE102</i>	
<i>Figura 82. Nomograma comparación de métodos deflexión de 80° - Curva ECE103</i>	
<i>Figura 83. Nomograma comparación de métodos deflexión de 90° - Curva ECE103</i>	
<i>Figura 84. Nomograma comparación de métodos deflexión de 100° - Curva ECE</i>	104
<i>Figura 85. Nomograma comparación de métodos deflexión de 110° - Curva ECE</i>	104

Figura 86. Nomograma comparación de métodos deflexión de 120° - Curva ECE
.....105

Figura 87. Nomograma sobreancho según modelaciones – Curva ECE y
V=40km/h108

Figura 88. Nomograma sobreancho según modelaciones – Curva ECE y
V=50km/h108

Figura 89. Primera ventana – presentación herramienta académica determinación
de sobreancho111

Figura 90. Segunda ventana – parámetros de entrada herramienta académica
determinación de sobreancho.....112

Figura 91. Tercera ventana – cálculo de sobreancho herramienta académica
determinación de sobreancho.....112

Lista de anexos

Anexo 1 Modelaciones vehículo INVIAS.....	119
Anexo 2 Cálculos por tipo de curva.	120
Anexo 3 Levantamiento topográfico curvas.	121
Anexo 4 Registro Fotográfico prueba pruebas piloto.	122
Anexo 5 Modelaciones vehículo C3S2 campo.....	123
Anexo 6 Herramienta Académica	124

RESUMEN

El sobreancho en curvas horizontales, ha sido motivo de investigación durante las últimas décadas por varios autores influyentes a nivel nacional e internacional; en Colombia, particularmente, en las vías principales a lo largo del territorio, gran parte de los incidentes en curvas suceden en la mayoría de los casos, por la falta de pericia de los conductores o por la falta de sobreancho de las mismas, éste último factor es imputado al diseño inapropiado en el cálculo de ancho de calzada adicional de las carreteras, lo que se ha convertido en un tema de constante investigación y preocupación para los diferentes entes participativos, autoridades, conductores y ciudadanía en general; en donde una de las características fundamentales para contar con una carretera segura, es el cálculo apropiado de los sobreanchos y contar un diseño geométrico óptimo y funcional. El objetivo del presente estudio es proponer el sobreancho mínimo requerido de acuerdo al vehículo C3S2 en curvas horizontales para el diseño de vías en Colombia.

El desarrollo del presente trabajo investigativo se lleva a cabo mediante una metodología investigativa que se fundamenta en el análisis de la información obtenida tras la ejecución de pruebas piloto y el continuo análisis de los datos obtenidos de manera analítica tras la aplicación de las formulaciones expuestas, lo anterior se realiza en tres fases, así; fase uno, la recopilación y categorización: búsqueda y análisis de información. Fase dos: Determinación del sobreancho; desarrollo de la expresión matemática que permite evaluar el sobreancho requerido de acuerdo a las variables ya definidas para la implementación del software de simulación de sobreancho como para el uso de la normatividad vigente. Y por último, fase tres: Análisis de resultados; determinación del sobreancho y la elaboración de tablas de datos de estimación de anchos de calzada sugeridos para las vías colombianas incorporando una propuesta de especificación técnica para calcular el sobreancho mínimo requerido de acuerdo con la investigación del proyecto y la elaboración de la herramienta académica y documento final.

Con los cálculos obtenidos y las evidencias encontradas, se efectuó una herramienta académica por medio del software Microsoft Visual Studio 2019 en la versión gratuita community para estudiantes y colaboradores, la cual busca efectuar el cálculo del sobreancho basado en las metodologías planteadas en la investigación, que permitan que el diseñador pueda comparar de manera directa los valores obtenidos de sobreancho y así poder efectuar un diseño geométrico más óptimo y de mayor eficacia, salvaguardando la seguridad de los usuarios y la viabilidad del proyecto desde el área ambiental al ver reducida la sección transversal de diseño.

Se recomienda hacer un levantamiento del parque automotor vigente que circula en el territorio nacional y evaluar una ficha por cada vehículo en la sección de semirremolques con las dimensiones reales, ya que este factor incide en la

determinación del sobreancho requerido en las vías, igualmente, en futuras investigaciones se sugiere evaluar esta variable geométrica (sobreancho), para la nueva clase de vías que se están construyendo actualmente, por último se propone para trabajos futuros, que la herramienta académica presentada, sea mejorada, de manera que se puedan efectuar cálculos de sobreancho no solo para vehículos de gran envergadura, sino que a su vez pueda realizar el cálculo para diferentes tipos de vehículos, en donde el usuario pueda ingresar estas características y el software arroje los resultados obtenidos.

1. TITULO DEL PROYECTO

PROPUESTA DE MODIFICACIÓN DEL SOBREANCHO MÍNIMO REQUERIDO PARA EL VEHÍCULO C3S2 EN EL DISEÑO DE VÍAS EN COLOMBIA.

1.1. Línea de Investigación

El tipo de investigación está enmarcada en la modelación y simulación de problemas complejos de datos en ingeniería civil; debido a que se definirá el uso del alcance dado a la reglamentación colombiana vigente para el cálculo de sobreanchos, a partir del análisis de las variables dentro de la ecuación determinada actualmente mediante el empleo del software especializado Vehicle Tracking para determinar el sobreancho mínimo y contrastarlo con las medidas reales de las pruebas piloto.

2. INTRODUCCIÓN

En las vías del territorio colombiano, gran parte de los incidentes en curvas suceden en la mayoría de los casos, por la falta de pericia de los conductores o por la falta de sobreancho de las mismas, éste último factor es imputado al diseño inapropiado en el cálculo de ancho de calzada adicional de las carreteras, lo que se ha convertido en un tema de constante investigación en el área de infraestructura vial; en donde una de las características fundamentales para contar con una carretera segura, es el cálculo apropiado de los sobreanchos y contar un diseño geométrico óptimo y funcional.

El sobreancho en curvas horizontales, ha sido motivo de investigación durante las últimas décadas por varios autores influyentes a nivel nacional e internacional como John Jairo Agudelo, Ortiz & Díaz, Grisales, Blázquez & García, Danilo Vic & Storni, Giunta, Poe, entre otros, quienes han analizado las variables que inciden en el cálculo del ancho adicional de calzada, indicando que los factores que repercuten en la obtención del valor de sobreancho son las dimensiones de los vehículos, las características de operación de los mismos, el grado de deflexión de la curva y la velocidad de diseño de la carretera. En las diversas investigaciones arrojan como resultados valores de sobreancho sugeridos para diseño de vías, donde su implementación se encuentra en función de las variables anteriormente enunciadas.

Actualmente, el sobreancho se calcula y/o estima con base al tipo de vehículo, es decir, si el vehículo es o no articulado, en ese sentido, cuando el vehículo es articulado los procedimientos de estimación se encuentran estipulados en el manual de diseño geométrico del INVIAS, el cual, está estructurado para carreteras con velocidades altas y amplios radios de giro, variables cuyos valores no son de uso convencional en las vías colombianas; debido a que estas se caracterizan por presentar velocidades y radios de giro inferiores, incidiendo de manera significativa en el sobreancho. Lo anteriormente descrito, origina la necesidad de efectuar una revisión minuciosa de la metodología pautada en el manual de diseño geométrico de carreteras y así, realizar los respectivos ajustes de acuerdo con las condiciones de circulación.

De acuerdo a lo estipulado en el enunciado previo, se presenta una propuesta para la especificación técnica en la cual se definirán las exigencias y procedimientos para el cálculo de sobreancho en los diferentes tipos de curvas horizontales a partir de diferentes modelaciones, en las cuales se tendrá en cuenta el análisis de las variables que se encuentran condicionadas por el radio de giro, la velocidad de diseño, tipo de curva y la topografía del territorio colombiano, con el objetivo de determinar el sobreancho mínimo requerido de acuerdo a las características de sección del vehículo C3S2 en vías de Colombia.

Adicionalmente, las modelaciones tienen por objetivo contrastar los posibles recorridos generados por el vehículo, a través del software Vehicle Tracking, el cual permite modelar dichos recorridos y así determinar un análisis estadístico a partir de los resultados obtenidos con las modelaciones generadas, teniendo en cuenta las diferentes variables y con el fin de establecer una herramienta académica que permita determinar el sobreancho, de manera más específica de acuerdo a las condiciones reales de diseño a emplearse especificando la viabilidad óptima del diseño geométrico y preservar las características de seguridad vial.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

El presente trabajo de grado se basa en establecer una diversidad de curvas, es decir, espirales y espirales – círculo – espiral, con varios ángulos de deflexión y radios de curvatura, incluyendo los radios mínimos estipulados de acuerdo a las velocidades de diseño, tal y como lo enuncia el Manual de Diseño Geométrico de Vías de 2008; el cual, expone los lineamientos que se deben cumplir y seguir para la realización de un diseño vial óptimo, económico, y que cumpla con los requisitos mínimos de seguridad vial.

En ese sentido, uno de los parámetros a revisar y ajustar en ésta propuesta, es la determinación del sobreancho, el cual corresponde a una distancia adicional que se le debe sumar al carril interno de la curva y que se desarrolla a lo largo de la misma. Conforme a esto, el Manual de Diseño de INVIAS 2008, propone una metodología para dicho cálculo, basada en el tipo de vehículo que circula por la misma (rígido y articulado). No obstante, las formulaciones planteadas conllevan a que el valor obtenido para vehículos articulados en algunas ocasiones es mayor que el ancho de carril establecido, y en el caso en el que se realiza la obtención de este valor teniendo en cuenta las dimensiones de un vehículo rígido se obtienen valores en algunas ocasiones inferiores a cincuenta centímetros (50 cm).

Lo anterior, implica que en el caso de los sobreanchos muy grandes (calculados con articulados) se debe llevar a cabo la construcción de una sección transversal muy amplia lo que puede generar sobrecostos en la construcción. De manera contraria, se observa el caso en el cual se calcula este parámetro por medio de un vehículo rígido, en donde se obtienen valores de sobreancho demasiado pequeños, lo cual conlleva a que en el momento en el que la vía proyectada se encuentre construida los vehículos de gran tamaño deban invadir el carril opuesto con el fin de poder realizar el giro en cada una de las curvas, afectando la movilidad y seguridad de la vía.

Un ejemplo, de esta última situación, se observa en la vía que conecta a Ibagué con Cajamarca denominada “La Línea”, en la cual debido a que se presentan en diseño geométrico curvas muy cerradas (ángulos de deflexiones altos) los vehículos de gran envergadura, camiones superiores al C3S2 deben invadir el carril contrario con el fin de dar el giro de manera adecuada.

Otro claro ejemplo que atañe el diseño Geométrico en cuanto a sobreanchos se evidencia en la vía que se comunica entre Villeta – Guaduas, ya que muestra múltiples falencias en cuanto a movilidad de flujo continuo debido a los espacios libres o sobreanchos reducidos que se presentan constantemente, por lo anterior la invasión de carril es notoria, lo que conlleva a que deban parar los vehículos en

sentido opuesto para permitir el paso del vehículo pesado ocasionando trancones en vías primarias y que actualmente conecta con la Ruta del Sol Sector I.

Consecuentemente, para establecer el espacio libre de las curvas es necesario reconsiderar los factores que inciden en la determinación del cálculo de sobreancho dependiendo del tipo de curva y de los vehículos, que para este estudio serán los vehículos de análisis superiores al C3S2, y donde se contemplarán tres camiones de mayor circulación por las vías nacionales.



Figura 1. Vehículo de transporte de carga extra dimensionada en Colombia
Fuente: <http://boomlts.com/>

Por consiguiente, se plantea éste trabajo para calcular los sobreanchos por medio de la metodología enunciada en el Manual de Diseño Geométrico de Carreteras de 2008 y contrastarlo con los recorridos de las pruebas piloto, que pueden llegar a tener el vehículo proyecto, por medio del software Vehicle Tracking el cual permite modelar la traza de los recorridos de los vehículos y con esto se determinará si el diseño geométrico en el tema de sobreanchos es óptimo y preserva las características de seguridad vial establecidas por el manual.

Las variables a tener en cuenta para esta investigación son; el tipo de vehículo que circulan actualmente en el territorio colombiano, tipos de Curva: Espirales y Espiral – Circulo – Espiral, ángulos de Deflexión, radio de Curvatura y velocidades de operación de acuerdo al análisis.

¿Cuáles son los sobreanchos mínimos requeridos de acuerdo a las características de sección del vehículo C3S2 en curvas horizontales para el diseño de vías en Colombia?

4. JUSTIFICACIÓN

Se considera que uno de los parámetros a revisar y ajustar en el diseño geométrico, es el sobreancho, una vez que el Manual de Diseño de carreteras de INVIAS 2008, propone una metodología en la que las formulaciones planteadas conllevan a que el valor obtenido en el caso de los sobreanchos muy grandes¹ (calculados con articulados) se deba llevar a cabo la construcción de una sección transversal muy amplia generando sobre costos; por otro lado, en un vehículo rígido, se obtienen valores de sobreanchos pequeños, lo cual implica que en la vía, los vehículos de gran tamaño deban invadir el carril opuesto con el fin de poder dar el giro en cada una de las curvas, afectando la movilidad y seguridad de la vía.

Se hace necesario contrastar los recorridos que puede llegar a tener con el vehículo tipo, a través del software Vehicle tracking el cual permite modelar los recorridos de los vehículos y así se determinará la viabilidad del diseño geométrico (óptimo) en el tema de sobreanchos.

Debido al alcance se ha sugerido como trabajos futuros y de mayor análisis realizar un estudio a detalle que permita estipular el sobreancho mínimo requerido de acuerdo a las características de sección de vehículos de mayor envergadura en curvas horizontales para el diseño de vías en Colombia.

¹ CÁRDENAS, Yerly Carolina & MONTOYA, Ginna Ivonne. 2017. Propuesta para la Determinación del Sobreancho mínimo requerido para el vehículo C3S2 en el diseño de vías en Colombia. *Proyecto de Grado*. Bogotá : Escuela de Ingenieros Militares, 2017. Vol. I, págs. 100

5. OBJETIVOS

5.1. Objetivo General

Proponer el sobreancho mínimo requerido de acuerdo al vehículo C3S2 en curvas horizontales para el diseño de vías en Colombia.

5.2. Objetivos Específicos

- Realizar la caracterización física del vehículo de mayor envergadura que transitan por el territorio colombiano, así como los diferentes tipos de curva horizontales en el diseño de vías.
- Analizar y/o modificar las características de sección para vehículos de análisis de sobreancho enmarcados en el Manual de Diseño geométrico 2008.
- Ejecutar diferentes modelaciones a partir de los recorridos establecidos con el software Vehicle Tracking para ángulos de deflexión entre 20° y 120°, y radios para velocidades de 40 a 100 km/h establecidos por el INVIAS contenidas en los diferentes tipos de curvas de acuerdo a las velocidades de diseño.
- Realizar un análisis estadístico a partir de los resultados obtenidos con las modelaciones teniendo en cuenta las diferentes variables y a partir de estas, establecer una propuesta de ábaco que estipule el sobreancho real a emplearse en el diseño de vías.
- Realizar pruebas piloto a partir del levantamiento de huellas de neumáticos del vehículo C3S2, teniendo en cuenta la curva crítica obtenida de acuerdo a los análisis de sobreancho efectuados por medio de las simulaciones computacionales.
- Generar una herramienta académica que conlleve a determinar el sobreancho de manera más específica de acuerdo a las condiciones reales de diseño y en función a esto realizar un comparativo entre los métodos y formulaciones establecidos en el manual de Diseño Geométrico de 2008, frente a los resultados obtenidos en la presente investigación, para determinar el sobreancho mínimo, con el fin de establecer similitudes y/o diferencias entre las metodologías planteadas.

6. ESTADO DEL ARTE

En las últimas décadas, referente exclusivamente al diseño geométrico de vías y los parámetros que permitan un óptimo diseño, los cuales han sido tema de investigación, de acuerdo a las variables como radios de giro, anchos de calzada, ángulos de deflexión, peraltes, velocidades, sobreanchos, son entre otras, elementos que se encuentran en constante evolución siendo temas de interés para análisis, permitiendo así un desarrollo más adecuado en las vías del territorio establecidos en los manuales Colombianos²³ e internacionales.

De los estudios de diseño geométrico de vías ajustado al manual colombiano por Agudelo⁴ y sobreancho en curvas⁵ se evidencia que en la normatividad colombiana no contiene cálculos de sobreancho sugeridos que permitan ser implementados en el diseño geométrico para los diferentes tipos de vía, como resultado, se presentan incertidumbres al diseñar y construir anchos de calzadas inapropiados, debido a que los valores estimados son mayores al valor requerido o viceversa, que generan riesgos a la circulación del transporte en el territorio nacional.

De modo que, es indispensable para los diseñadores de vías tomar medidas alternativas para calcular el ancho adicional de calzada en curva; una de estas radica en herramientas graficas como el software avanzado de simulación de áreas de barrido como opción veraz, sin embargo, en la implementación de dichos programas, es compleja la adaptación de vehículos que sean coincidentes con el parque automotor que circula en Colombia, igualmente, las normas de diseño establecidas para la simulación, requieren revisión para estudiar la compatibilidad que dichos estándares tendrían con las características de las vías del País; en consecuencia, se debe evaluar si las directrices de radios mínimos de giro y velocidades de diseño arrojan resultados coherentes para ser empleadas en el manual de diseño de carreteras.

El sobreancho en curvas horizontales requerido ha sido trabajado por varios investigadores internacionales influyentes a lo largo de las últimas décadas que han analizado aquellas variables que inciden en el cálculo del ancho adicional de calzada; en primera instancia mencionan que los factores que repercuten en la obtención del valor de sobreancho son las dimensiones de los vehículos, las características de operación de los mismos, el grado de deflexión de la curva y la

² MINISTERIO DE TRANSPORTE. 2008. Manual de Diseño Geométrico INVIAS. Colombia: Instituto Nacional de Vías, 2008. 276p.

³ GRISALES, J. C. (2002). Diseño Geométrico de Carreteras (Primera ed.). Bogotá:

⁴ AGUDELO, John Jairo Ospina. 2002. Diseño Geométrico de vías ajustado al manual colombiano. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de minas. Medellín: s.n., 2002. 530p.

⁵ GIUNTA, José A. 2014. Sobreancho en curvas. Buenos Aires: s.n., 2014. 37p.

velocidad de diseño de la carretera, en su investigación incluyeron valores de sobreancho sugeridos para diseño de vías, donde su implementación se encuentra en función de las variables mencionadas⁶.

En cuanto al manual de diseño geométrico de carreteras el Ministerio de Transporte de Perú indica que el sobreancho se determina exclusivamente en función de:

- Tipo de vehículo,
- Radio de la curva,
- Velocidad de diseño.

Por lo tanto, obligan que la inclusión del ancho adicional de calzada debe ser revisado para velocidades considerables como bajas⁷.

Tal como lo indica Poe⁸ en su guía para el diseño geométrico y factores de operación que impactan el uso de Autopistas del año 2010, asegura que adicional a las variables establecidas por el manual de vías de Perú también incide el peralte en el ancho de calzada demandado por los vehículos al efectuar el recorrido en una curva.

En el congreso vialidad y tránsito realizado en Argentina realiza algunas consideraciones sobre el cálculo de sobreancho establecido por la normatividad Argentina vigente en su año de exposición, de acuerdo con la investigación realizada y mencionado en su informe, algunos de los aspectos que se deben tener en cuenta en la metodología reglamentada, es incluir en todos los cálculos de sobreancho, las dimensiones reales de los distintos tipos de vehículos que transitan en el País de análisis vigentes, así como investigar los valores de sobreancho para velocidades y radios de giro bajos⁹.

Adicionalmente, en su investigación incluyó formulaciones que se implementan en los Manuales y/o Normas de los países de Chile, Brasil y Estados Unidos con la ASHTTO, que le permitieran estudiar las variables que afectan de manera considerable el valor, para así establecer las respectivas conclusiones de la

⁶ DONNELL, y otros. 2001. Truck Safety Considerations for Geometric Design and Traffic Operations. [En línea] Disponible desde Internet en: <http://nacto.org/docs/usdg/truck_safety_considerations_for_geometric_design_and_traffic_operations_donnel1.pdf> [con acceso el 01 - 07 - 2018].

⁷ MINISTERIO DE TRANSPORTE Y COMUNICACIONES. 2013. Manual de Diseño Geométrico de Carreteras. Perú: Viceministerio de Transporte. Dirección General de Caminos y Ferrocarriles, 2013. pág. 172 - 185.

⁸ POE, Christopher. 2010. Guide for Geometric Design and Operational Factors That Impact Truck Use of Toll Roads. [En línea] Disponible desde Internet en: <<http://ibttta.org/sites/default/files/Guide%20for%20Geometric%20Design%20and%20Operational%20Factors%20that%20impact%20Truck%20use%20of%20Tol%20l%20Roads%20TTI.pdf>> [con acceso el 03 - 08 - 2018].

⁹ HIGUERA, Geisa Jinnett Puerto. 2017. Determinación del sobreancho requerido para vías con bajas velocidades. Bogotá DC: Universidad Santo Tomas, 2017.

expresión matemática vigente y generar las recomendaciones de uso de la mencionada ecuación y recalcular las tablas de sobreancho, considerando el modelo de la ASHHTO que calcula dicho valor como la “diferencia entre el ancho en curva y en recta”¹⁰.

En el año 2015 el grupo de investigadores de la universidad de Belgrado, en Serbia, realizaron la comparación del “diseño de carreteras forestales: método directo de proyección de caminos forestales - todas las fases se realizan pruebas de campo”¹¹, entre dos metodologías para deducir el sobreancho necesario para circular por una vía forestal, con presencia de radios pequeños; el primer método, tradicional, calculado a partir de fórmulas y el segundo, simulado con un software; proyecto denominado.

Los resultados del proyecto determinaron que requiere un 3,0% de área adicional para el tránsito de vehículos con el método convencional a diferencia del método de simulación. En ese sentido el indicado cálculo de sobreancho genera excesivos movimientos de tierra y materiales necesarios para la construcción de la vía; es de vital importancia destacar que en el anterior estudio consideran “radios cortos” a aquellos que se encuentran entre 70 metros y 100 metros.

En el año 2017, se desarrolló en la universidad Santo Tomas, una proyecto de grado titulado “determinación del sobreancho requerido para vías con bajas velocidades de diseño en Colombia”¹², sin embargo, en el mismo periodo se desarrolló en la especialización en Diseño y Construcción de Vías y Aeropistas de la Escuela de Ingenieros Militares el trabajo de grado presentado “Propuesta para la Determinación del Sobreancho mínimo requerido para el vehículo C3S2 en el diseño de vías en Colombia”¹³ en donde se realizó una propuesta para el cálculo de sobreancho para curvas espiralizadas por medio de ábacos y/o ecuaciones específicas según la velocidad de diseño del corredor vial y se sugirió como trabajos futuros y de mayor análisis la realización de un estudio a detalle que permita estipular el sobreancho mínimo requerido de acuerdo a las características de sección de vehículos de mayor envergadura en curvas horizontales para el diseño de vías en Colombia.

¹⁰ GIUNTA, José A. 2014. Sobreancho en Curvas. Buenos Aires : s.n., 2014., p.32

¹¹ DANILOVIC', Milorad y STOJNIĆ, Dušan. 2015. The State of Forest Roads in Serbia. Lviv, Ukraine : University of Belgrade, 2015. . [En línea] Disponible desde Internet en: <<https://es.slideshare.net/RadmilaUstych/serbia-presentation-52881229>> [con acceso el 01 - 07 - 2018].

¹² HIGUERA, Geisa Jinnett Puerto. 2017. Determinación del sobreancho requerido para vías con bajas velocidades. Bogotá DC: Universidad Santo Tomas, 2017

¹³ CÁRDENAS, Yerly Carolina & MONTROYA, Ginna Ivonne. 2017. Propuesta para la Determinación del Sobreancho mínimo requerido para el vehículo C3S2 en el diseño de vías en Colombia. *Proyecto de Grado*. Bogotá : Escuela de Ingenieros Militares, 2017. Vol. I, pág. 100.

En el año 2018, se realizó, en la universidad Santo Tomás, un trabajo de grado, en la cual se estudiaron los “radios de giro en camiones articulados para diseño vial urbano en Colombia en la que se determinó las dimensiones de los vehículos articulados C3S2 y C3S3 a nivel urbano, determinando los radios de giro con el fin de complementar el parque automotor existente en Colombia”¹⁴.

Así mismo y basados en los estudios realizados se evidencia que en la normatividad colombiana no contiene cálculos de sobreancho sugeridos que permitan ser implementados en el diseño geométrico para los diferentes tipos de vías, por consiguiente, se presentan incertidumbres al diseñar y construir anchos de calzadas inapropiados, debido a que los valores estimados son mayores al valor requerido o viceversa, que generan riesgos a la circulación del transporte en el territorio nacional.

¹⁴ CAÑÓN Buitrago, Elkin Darío; 2018 Radios de giro en camiones articulados para diseño vial urbano en Colombia, Universidad Santo Tomás, 123p.

7. MARCO DE REFERENCIA

7.1. Marco Teórico.

En el diseño geométrico es de vital importancia que, a partir de diferentes elementos, o factores internos y externos, se establece de forma definitiva de modo que satisfaga de la mejor manera aspectos como la seguridad, funcionalidad y economía. Por lo tanto, es importante conocer los conceptos básicos que se emplearán para el adecuado desarrollo de la investigación.

Una VÍA se define como una infraestructura de transporte principalmente acondicionada dentro de una franja de terreno llamada derecho de vía, con el propósito de conceder a los vehículos de tráfico pesado y liviano, la circulación de forma continua con niveles adecuados de seguridad y comodidad¹⁵.

FACTOR SEGURIDAD, considerada una de las premisas más importantes en el diseño geométrico de una carretera, debido a que nos indica que entre más uniforme es una curvatura se considera para el usuario optima y segura.

VELOCIDAD DE DISEÑO: es un componente que se define en la trayectoria de una carretera dependiendo del terreno y las zonas circundantes, por lo tanto, corresponde a una velocidad de referencia que sirve de guía para definir las especificaciones mínimas para el diseño geométrico de carreteras, en ese sentido se asumirá que las curvas a ser estudiadas presentan velocidades de diseño homogénea, es decir, VTR “definida en función de la categoría de la carretera y el tipo de terreno. En ella se resume el equilibrio entre el mejor nivel de servicio que se puede ofrecer a los usuarios de las carreteras colombianas y las posibilidades económicas del país.”¹⁶.

¹⁵ BLAZQUEZ, Luis Bañon y GARCÍA, José Francisco Beviá. 2000. *Manual de carreteras. Volumen II*. [ed.] Contratista de Obras, S.A. Ortiz e Hijos. España : Universidad de Alicante. Departamento de Ingeniería de la Construcción, Obras Públicas e Infraestructura Urbana, 2000. pág. 409. Vol. II.

¹⁶ AGUDELO, John Jairo Ospina. 2002. *Diseño Geométrico de vías ajustado al manual colombiano*. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de minas. Medellín: s.n., 2002. P135.

CATEGORÍA DE LA CARRETERA	TIPO DE TERRENO	VELOCIDAD DE DISEÑO DE UN TRAMO HOMOGÉNEO V_{TR} (km/h)									
		20	30	40	50	60	70	80	90	100	110
Primaria de dos calzadas	Plano										
	Ondulado										
	Montañoso										
	Escarpado										
Primaria de una calzada	Plano										
	Ondulado										
	Montañoso										
	Escarpado										
Secundaria	Plano										
	Ondulado										
	Montañoso										
	Escarpado										
Terciaria	Plano										
	Ondulado										
	Montañoso										
	Escarpado										

Figura 2. Velocidad de Diseño de un tramo homogéneo (VTR), Km/h.

Fuente: Manual de Diseño geométrico, 2008 Tabla 2.1.

VELOCIDAD ESPECÍFICA DE LA CURVA HORIZONTAL (VCH): se debe considerar que estos parámetros incluidos dentro de un tramo homogéneo,¹⁷ se deben considerar:

- La VTR en que se encuentra la curva horizontal.
- El sentido en que el vehículo realiza el recorrido.
- La Velocidad Específica asignada a la curva horizontal anterior.
- La longitud del Segmento Recto anterior.
- La deflexión.

VEHÍCULO DE DISEÑO: Corresponde al vehículo representativo del parque automotor que puedan circular por una vía específica.

¹⁷ MINISTERIO DE TRANSPORTE. 2008. Manual de Diseño Geométrico INVIAS. Colombia: Instituto Nacional de Vías, 2008. 276p

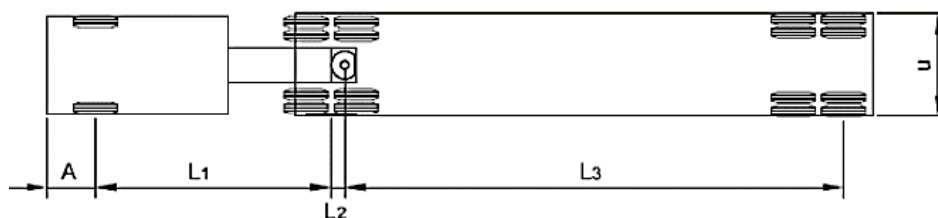


Figura 3. Vehículo C3S2 dimensiones.
Fuente: Manual de diseño geométrico 2008.

Tabla 1 Dimensiones del vehículo C3S2

Vehículo	Categoría	A (m)	L ₁ (m)	L ₂ (m)	L ₃ (m)	L ₄ (m)
C3S2	Tractocamión de tres ejes con semirremolque de dos ejes	1,22	5,95	0,00	12,97	2,59

Fuente: Manual de diseño geométrico 2008.

RADIO DE GIRO: Corresponde a la longitud del radio de la circunferencia descrita por la rueda delantera del lado opuesto de un vehículo al realizar un giro¹⁸

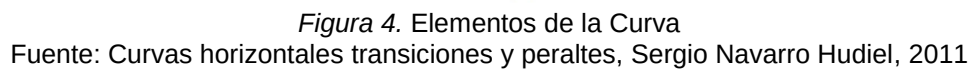
CURVAS HORIZONTALES: Son aquellos arcos (circunferencia) de radio variable que son utilizados para unir dos tangentes de un alineamiento cuyos parámetros están definidos en la Figura 4. Elementos de la Curva.

Por lo tanto, para determinar el sobreancho se debe considerar dos casos cuando el eje replanteado es:

- a. Curva espiral y,
- b. Curva circular¹⁹

¹⁸ MINISTERIO DE TRANSPORTE Y COMUNICACIONES. 2013. Manual de Diseño Geométrico de Carreteras. Perú: Viceministerio de Transporte. Dirección General de Caminos y Ferrocarriles, 2013. pág. 172 - 185.

¹⁹ ORTÍZ, Liliana María Contreras y Díaz, Omar Brilla. 2009. Diseño Geométrico de Vías Mediado por TIC (Tecnologías de la información y la Comunicación). Bucaramanga, PERÚ : Universidad Industrial de Santander, 2009. pág. 23



PI: Punto de intersección de la prolongación de las tangentes.
 PC: Punto Comienzo.
 PT: Punto de Termino.
 PSC: Punto sobre la curva circular.
 PST: Punto sobre tangente.
 O: Centro de curva.
 Δ : Ángulo de deflexión de las tangentes
 Δ_c : Ángulo central de curva circular.
 Φ : Ángulo de una cuerda cualquiera.
 Φ_c : Ángulo de una cuerda larga.
 G_c : Grado de curvatura
 R_c : Radio de la curva.
 ST: Subtangente
 E: externa
 M: Ordenada media
 C: Cuerda.
 CL: Cuerda larga
 L: Longitud del arco.
 L: Longitud de la curva circular.

- **Curva Circular.**

Se define como un arco de circunferencia cuyo radio varía desde cero metros hasta a un valor tal, que dicho arco elimine el tramo en tangente correspondiente a la recta más corta²⁰ que se emplea en vías.

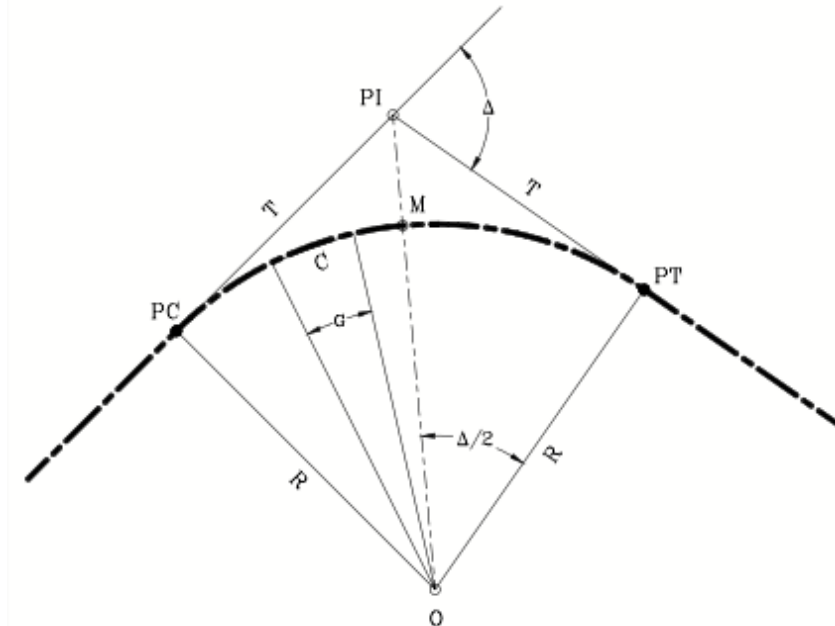


Figura 5. Elementos de la Curva Circular

Fuente: Diseño Computarizado de carreteras, John Jairo Agudelo Ospina

Para contemplar una curva circular simple, en el diseño geométrico se debe tener un radio de un kilómetro mínimo como parámetro establecido en el Manual de Diseño Geométrico INVIAS del 2008.

- **Curva Espiral – Espiral:**

Se presentan cuando existe unión de dos espirales e incluye un radio único en el centro tanto simétrico como asimétrico.

²⁰ ARQHYS.COM. 2012. Sobreancho de vía y su Transición. [En línea] Diciembre de 2012. [Citado el: 08 de Agosto de 2019.] <http://www.arqhys.com/construccion/via-sobreancho.html>.

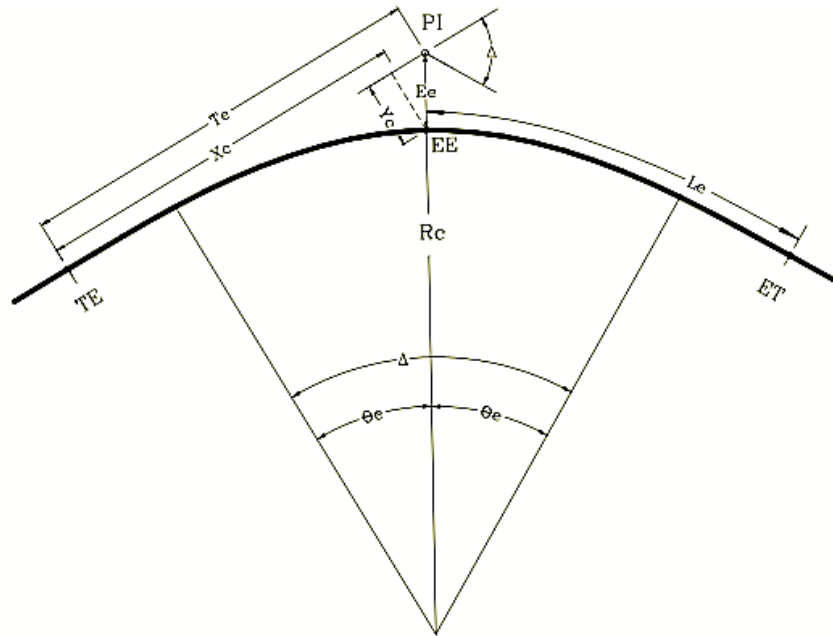


Figura 6. Geometría de la Curva Espiral –Espir
Fuente: Diseño Computarizado de carreteras, John Jairo Agudelo Ospina

- **Curva Espiral – Círculo – Espiral**

Se presentan todos los elementos, es decir, cuando dos líneas rectas cuyo ángulo de deflexión mediante arcos de transición y uno circular se empalman, para verificar las curvas espiral-círculo-espiral (ECE), es necesario realizar la verificación de la longitud de la espiral de acuerdo al coeficiente de fricción y aceleración centrífuga, se debe considerar la entretangencia cero de acuerdo al sentido de la curva, es decir, se unan tipo “S” y la velocidad de la misma cuando se tiene el diseño geométrico.

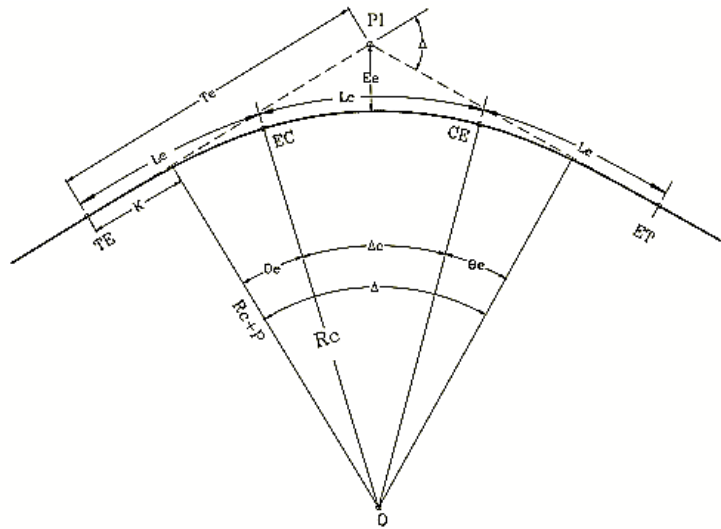


Figura 7. Geometría de la Curva Espiral – Círculo - Espiral
Fuente: Diseño Computarizado de carreteras, John Jairo Agudelo Ospina

El SOBREENCHO en curvas se define como la anchura adicional de calzada en curva requerido para la circulación de los vehículos, y se establece de acuerdo con el espacio ocupado por las ruedas de un vehículo dentro de una curva; las ruedas traseras hacen un recorrido curvo de radio menor que las delanteras, y el extremo lateral delantero describe una curva superior a la trayectoria del vehículo, este factor se determina de acuerdo al tipo de vehículo, es decir, si es, o no articulado, en ese sentido para vehículos articulados la metodología que se encuentra establecida en la normatividad Colombiana vigente, está hecho para vías con altas velocidades y amplios radios de giro, variables cuyos valores no son de uso convencional en carreteras colombianas; para dar más precisión, las vías del país, se caracterizan por presentar velocidades medias a bajas y radios de giro pequeños, incidiendo de manera significativa en el ancho adicional de calzada.

Por lo tanto, se realizará una revisión detallada de la metodología reglamentada en el manual de carreteras y poder realizar los respectivos ajustes, de acuerdo con las condiciones de circulación específicamente para las vías del país.

De acuerdo con la normatividad colombiana vigente del Instituto Nacional de Vías, establece que según el tipo de vehículo se determina el sobreancho requerido, es decir, para vehículos rígidos se emplea la expresión²¹:

²¹ MINISTERIO DE TRANSPORTE. 2008. Manual de Diseño Geométrico INVIAS. Colombia: Instituto Nacional de Vías, 276p

$$S = n \left(R_c - \sqrt{R_c^2 - L^2} \right) \quad 1$$

Donde:

S: Sobreancho requerido para la calzada

n: Número de carriles

R_c : Radio de Curva circular

L: Distancia entre el parachoques delantero y el eje trasero del vehículo.

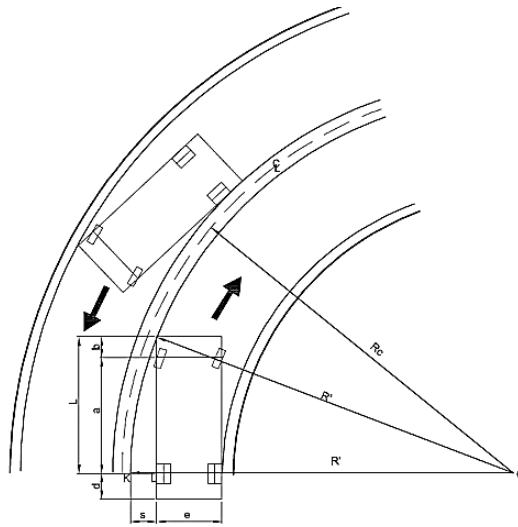


Figura 8. Sobreancho en curvas

Fuente: Manual de diseño geométrico de carreteras - 2008

Adicionalmente, en los diferentes manuales de diseño geométrico de carreteras incluyen a la expresión anterior un factor de seguridad empírico que depende del radio de curvatura y la velocidad de diseño llamada Formula de Barnett:

$$S = n \left(R_c - \sqrt{R_c^2 - L^2} \right) + \frac{0.1v}{\sqrt{R}} \quad 2$$

Donde:

S: Sobreancho requerido para la calzada

n: Número de carriles

R_c : Radio de Curva circular

L: Distancia entre el parachoques delantero y el eje trasero del vehículo.
V: Velocidad de operación del vehículo (Km/h)
R: Radio de la Curva (m).

En ese sentido, se debe tener en cuenta que en aquellas vías de carril doble y ambos sentidos cuyo ancho de calzada en entretangencia es mayor a los 7 metros, no se requiere sobreancho, sin embargo las curvas con ángulos de deflexión mayor a 120° se debe considerar determinar el sobreancho.

Por lo tanto, el sobreancho está restringido a curvas inferiores de 160 metros y requerido para los carriles que integran la calzada se debe construir en la parte interior de la curva. Por lo tanto, se debe fijar en la mitad de los bordes de la calzada ya ensanchada²².

Por otro lado, en vías terciarias para vehículos rígidos, el sobreancho se puede calcular de acuerdo a la ecuación 3 para cualquier valor del radio de la curva, considerando que aplica exclusivamente para vehículos pesados de 2 ejes con una distancia L = 8 metros (distancia entre el parachoques delantero y el eje trasero) y no para vehículos cuyas dimensiones sean inferiores o superiores.

$$S = \frac{32^2 \times n}{R_c} \quad 3$$

Donde:

S: Ancho requerido por la calzada, metros

n: Número de carriles

R_c: Radio de la curva, metros

En la ecuación 3 se verificó que esta formulación fue adoptada por el manual de diseño geométrico del INVIAS²³, a partir de la siguiente expresión:

$$S = \frac{l^2}{2R} \quad 4$$

²² MINISTERIO DE TRANSPORTE. 2008. Manual de Diseño Geométrico INVIAS. Colombia: Instituto Nacional de Vías, 2008. 276p

²³ AGUDELO, John Jairo Ospina. 2002. Diseño Geométrico de vías ajustado al manual colombiano. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de minas. Medellín: s.n., 2002. 530p.

La ecuación 3 difiere de la ecuación 2, debido a que no considera el factor de seguridad empírico que depende del radio de curvatura y la velocidad de diseño y del cual se obtienen resultados semejantes entre formulaciones.

Para el INVIAS, se concibe que para determinar el sobreancho en vehículos articulados, a partir del estudio de acuerdo a la Figura 9. Sobreancho requerido para un vehículo articulado C3S2; donde se especifica que tal ecuación es la sugerida por la AASHTO en su versión 2004 así:

$$S = A_c - A_T \quad 5$$

Donde:

S : Ancho requerido por la calzada, metros

A_c : Ancho de calzada en curva, metros

A_T : Ancho de calzada en tangente, metros

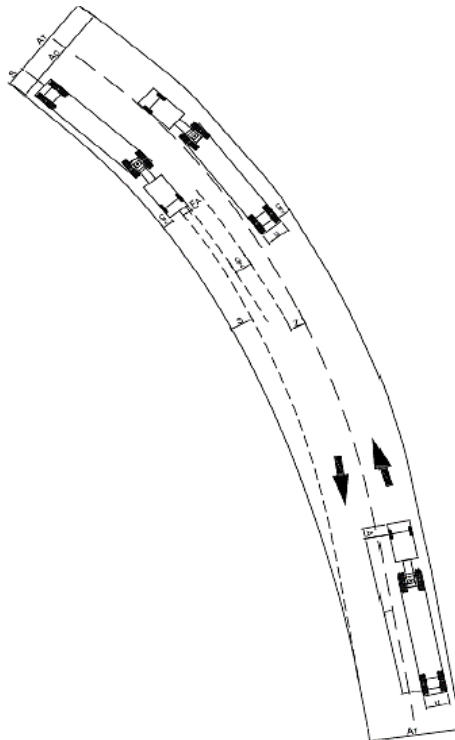


Figura 9. Sobreancho requerido para un vehículo articulado C3S2
Fuente: Manual de diseño Geométrico de carreteras 2008

El ancho de calzada requerido en una curva (A_c) corresponde a:

$$A_c = n(U + c) + (n - 1)x F_A + z$$

6

Donde:

n : número de carriles.

U : Ancho de la huella ocupado por el vehículo cuando está describiendo la trayectoria en curva, metros

$$\text{Siendo, } U = u + R_c - \sqrt{R_c^2 - (L_1 + L_2 + L_3)^2}$$

7

Donde:

u : Ancho del vehículo.

R_c : Radio de la curva, metros

L_1, L_2 y L_3 : dimensiones del Vehículo Tabla 1 Dimensiones del vehículo C3S2, metros

C : Espacio lateral de seguridad requerido por cada vehículo de acuerdo a la Tabla 2 Valor de C en función del ancho de la calzada, metros.

Tabla 2 Valor de C en función del ancho de la calzada

ANCHO DE CALZADA EN TANGENTE (A_T), m			
	6,00	6,60	7,20
C (m)	0,60	0,75	0,90

Fuente: Manual de diseño geométrico de carreteras 2008

F_A : Avance del voladizo delantero del vehículo sobre el carril adyacente cuando describe la trayectoria de la curva, metros

$$F_A = \sqrt{R_c^2 + A x (2 x L_1 + A)} - R_c$$

8

Donde:

R_c : Radio de la Curva, metros.

A : valor del voladizo o saliente delantero del vehículo

L₁: Distancia entre el eje delantero y el eje trasero de la unidad, metros

Z: Sobreancho adicional de seguridad, dependiendo de la curva y de la velocidad específica (VCH) y cuyo propósito es facilitar la conducción sobre la curva, metros.

Se debe tener en cuenta que el valor obtenido es básicamente experimental, por lo tanto se debe redondear al décimo superior.

$$z = 0,1 \times \sqrt{\frac{V_{CH}}{R_c}} \quad 9$$

Donde:

V_{CH}: Velocidad específica de la curva, Km/h.

R_c: Radio de la Curva, metros.

En efecto, la ecuación 9 no corresponde por la establecido con la ASHTTO, contrariamente a lo indicado en el manual del INVIAS (Ministerio de Transporte, 2008) manifiesta que la formulación para calcular el sobreancho total en vehículos articulados se establece de acuerdo con dicha expresión.

De acuerdo con la expresión de AASHTO²⁴, el factor de seguridad se calcula así:

$$WPS = V \sqrt{9.5/R} \quad 10$$

Donde:

V: Velocidad de operación del vehículo, Km/h

R: Radio de la curva, metros.

7.2. Marco contextual.

El alcance de uso de la reglamentación colombiana vigente para el cálculo de sobreancho en vehículos articulados; en la ecuación se implementarán distintos radios de giro y se evaluará el índice óptimo para obtener el sobreancho con dicha expresión, adicionalmente se estudiará y definirá si se requiere ajustar el procedimiento actual para obtener el ancho adicional de calzada, tanto en vehículos

²⁴ GIUNTA, José A. 2014. Sobreancho en curvas. Buenos Aires: s.n., 2014. 37p

rígidos como articulados, a partir del análisis de los modelos matemáticos que evalúan el ancho de seguridad dentro de la ecuación que permite estimar el sobreancho total; se identificarán los valores de radios de giro y velocidad de diseño que defina las exigencias y procedimientos para el cálculo de sobreancho en curvas, para uso académico y profesional.

Con base en lo anterior, en éste estudio se realizarán pruebas pilotos en función al diseño geométrico de vías en Colombia para curvas espiral – espiral y espiral – círculo – espiral; teniendo en cuenta el vehículo de diseño de mayor envergadura C3S2, basados en el estudio realizado en el 2018 denominado “*RADIOS DE GIRO EN CAMIONES ARTICULADOS PARA DISEÑO VIAL URBANO EN COLOMBIA*” en donde se enuncia que pese a la comparación de dimensiones de vehículos C3S2 de diferentes marcas “es imposible estandarizar los semirremolques y la longitud total de éste vehículo” ²⁵.

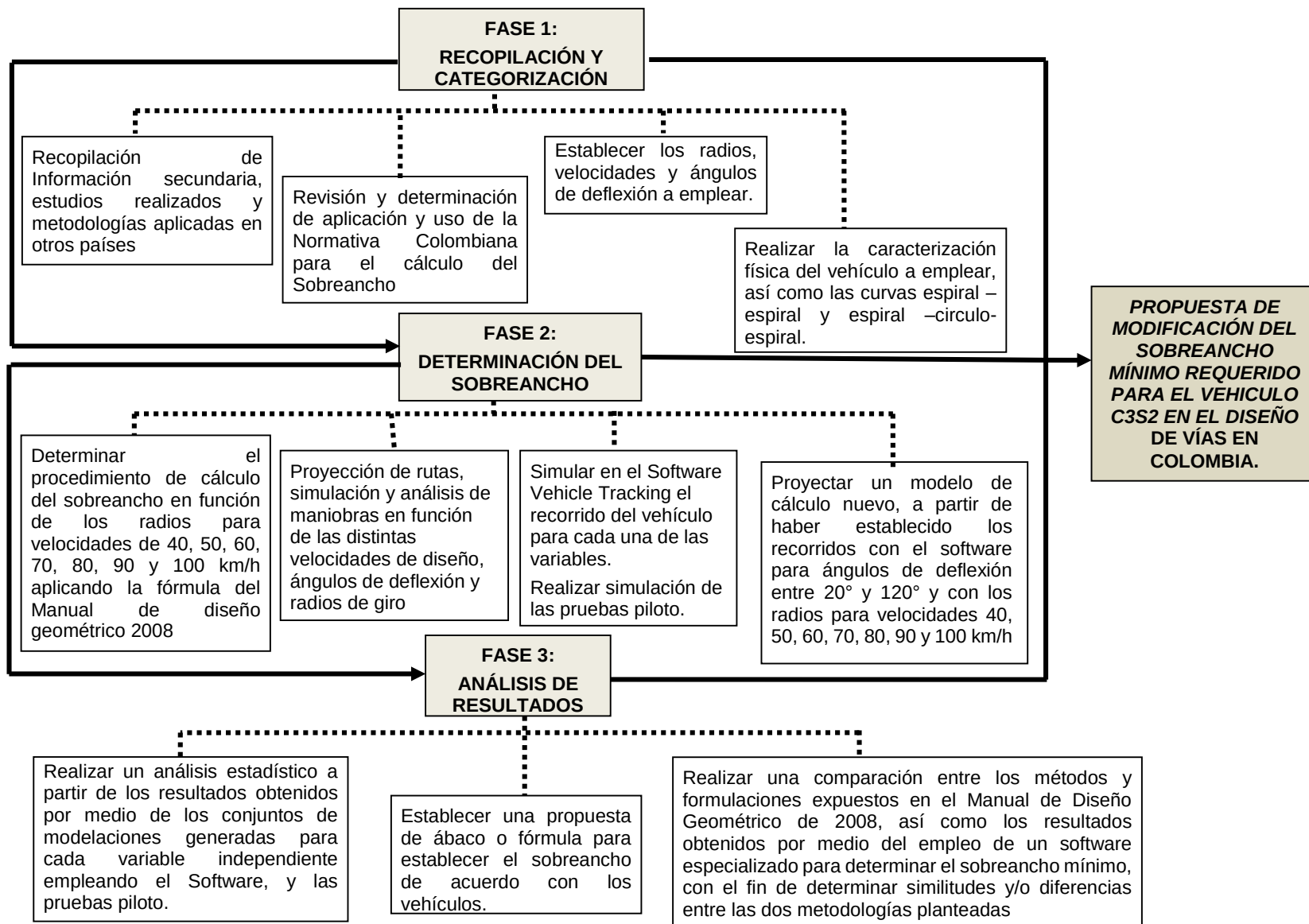
²⁵ CAÑÓN Buitrago, Elkin Darío; 2018 Radios de giro en camiones articulados para diseño vial urbano en Colombia, Universidad Santo Tomás, 123p.

8. MARCO METODOLÓGICO

En el presente capítulo se describe el marco metodológico que se establece, con el fin de cumplir cada uno de los objetivos planteados, el cual se fundamenta en el análisis de la información obtenida tras la ejecución de pruebas piloto y el continuo análisis de los datos obtenidos de manera analítica tras la aplicación de las formulaciones expuestas anteriormente en el marco teórico. Con base en estas dos formas de obtención de valores de sobreancho óptimos para el diseño de vías por los cuales transitan vehículos de carga pesada (C3S2) en Colombia.

En ese sentido, a continuación, se presenta el plan de trabajo a seguir el cual está dividido en tres grandes fases, las cuales se enuncian a continuación y se presentan en el siguiente diagrama:

1. FASE 1 - Recopilación y categorización; realizando la búsqueda y análisis de información.
2. FASE 2 - Determinación del sobreancho; es decir al desarrollo de la expresión matemática que permita evaluar el sobreancho requerido de acuerdo a las variables ya definidas para la implementación del software de simulación de sobreancho como para el uso de la normatividad vigente.
3. FASE 3 – Análisis de resultados; consiste en determinar el sobreancho y la elaboración de tablas de datos de estimación de anchos de calzada sugeridos para las vías colombianas incorporando una propuesta de especificación técnica para calcular el sobreancho mínimo requerido de acuerdo con la investigación del proyecto y la elaboración del documento final.



Tal y como se pudo observar, el desarrollo metodológico está dividido en tres grandes fases, las cuales a su vez están subdivididas en diferentes procedimientos y métodos a emplear, con el fin de efectuar el adecuado levantamiento de datos, y su respectivo análisis. A continuación su descripción.

8.1. Fase 1 – Recopilación y Categorización

En esta primera fase se desarrolla la búsqueda y fundamentación teórica del proyecto, para lo cual se efectúa la recopilación de información secundaria, entre la cual se encuentran estudios, metodologías, formulaciones matemáticas y/o expresiones que conlleven a la obtención del sobreancho tanto para vehículos rígidos como articulados, teniendo en cuenta que para esta investigación se pretenden estimar los valores óptimos de sobreancho para vehículos articulados.

Para tal fin se acudió a información de referencia reciente, es decir documentación que cuya fecha de publicación varía entre el 2000 y 2018, sin tener en cuenta el manual de diseño del INVIAS que presenta publicación de 1998, y con base en cual se realizó el manual que se emplea actualmente en Colombia para el diseño vial. Adicionalmente, gran parte de la información recolectada fue extraída de internet, a través de páginas y bases de datos que contaran con acceso a publicaciones, artículos y estudios efectuados tanto en Colombia como en otros países.

Posterior a esta recopilación de información, se realiza la revisión de las diferentes expresiones encontradas para el cálculo del sobreancho y se comparan con lo actualmente empleado bajo la Normativa Colombiana, la cual es la base de esta investigación. En ese sentido se verifica la aplicabilidad de las expresiones matemáticas en función al tipo de curva, radio, velocidad y ángulos de deflexión. Durante esta fase se establecen los diferentes tipos de curvas a emplear durante la investigación, así como sus características base de geometría.

Teniendo en cuenta que el principal aporte de esta investigación es la definición de una nueva metodología y/o expresión matemática que conlleve al cálculo más apropiado y ajustado a las condiciones reales de diseño en Colombia, es necesario efectuar una caracterización física del vehículo que circula por las vías de este territorio, razón por la cual esta primera fase contempla la ejecución de la caracterización física de un vehículo articulado catalogado en C3S2, con el fin de poder llevar a cabo las modificaciones necesarias en el software a emplear así como en la propuesta de formulación.

8.2. Fase 2 – DETERMINACIÓN DEL SOBREALCHO

Esta fase que mayor relevancia reviste en el marco metodológico que se llevará a cabo para la ejecución de este trabajo, una vez que responderá de manera directa al objetivo general de la misma. Es por ello, que esta se encuentra dividida en tres etapas, tal y como se describen a continuación:

8.2.1. Determinación Teórica de Sobreancho.

Por medio de esta etapa, se busca efectuar la determinación teórica de los valores de sobreancho, es decir calcular y/o estimar dichos valores basados en las expresiones y/o formulaciones matemáticas presentadas en el Manual de Diseño Geométrico de 2008, para cada una de las velocidades y radios que se encuentran en estudio dentro de este trabajo.

Para poder efectuar dichos cálculos es primordial definir las características de cada una de las curvas a evaluar, que para este caso corresponden a curvas Espiral-Espiral y Espiral-Círculo- Espiral, que como se ha mencionado anteriormente son las curvas más empleadas en el diseño de vías en Colombia, debido a las características topográficas. En ese sentido, se deberá efectuar el cálculo de los siguientes parámetros:

- Longitudes de las espirales para cada una las velocidades estudiadas.
- Radios de las curvas espirales y circulares, los cuales son función de la velocidad y deflexiones en estudio.
- Cálculo de sobreancho, el cual es función de las medidas del vehículo articulado por el INVIAS en su manual de diseño.

8.2.2. Simulaciones en el Software Vehicle Tracking – Tractocamión INVIAS 2008.

Tras efectuar los cálculos en función a los requisitos expuestos por el INVIAS, se realizarán una serie de modelaciones para las curvas espiral – círculo – espiral y espiral - espiral en donde se tienen en cuenta los siguientes factores:

- Ángulos de deflexión en estudio.
- Radio de curvatura.

- Camión de diseño, para este caso se modificaron las medidas estipuladas en el programa a emplear con el fin de ingresar las medidas del vehículo establecido en Colombia.

Se precisa que las medidas descritas en el programa hacen alusión a los vehículos de diseño empleados y enmarcados dentro de la normativa AASHTO, motivo por el cual es importante efectuar las modelaciones con las mismas medidas de vehículos obtenidas en el manual de INVIAS – 2008 con el fin de generar resultados comparables bajo las mismas premisas de cálculo.

Con objeto de efectuar un comparativo de la ecuación y las modelaciones se trazaron cada una de las curvas espiral - espiral y espiral - círculo - espiral controlando el ángulo de deflexión y el radio según la velocidad de diseño tal como se presenta a continuación:

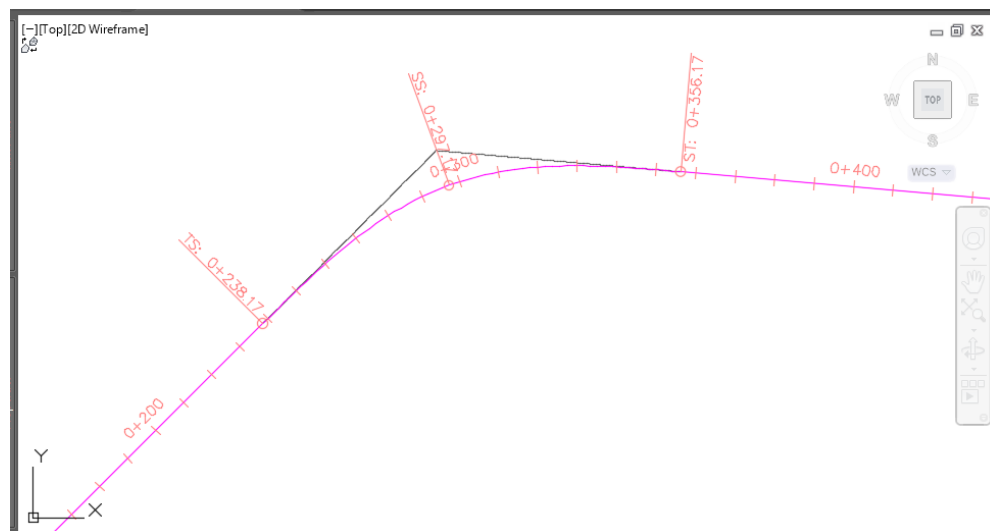


Figura 10. Curva ejemplo espiral – espiral
Fuente: Elaboración autores

Tras efectuar el alineamiento establecemos el ancho de carril, es decir, calzada total 7,30 metros que corresponden a 3.65 metros de ancho de carril y centro de carril de 1,825 metros para análisis del sobreancho como se presenta a continuación:

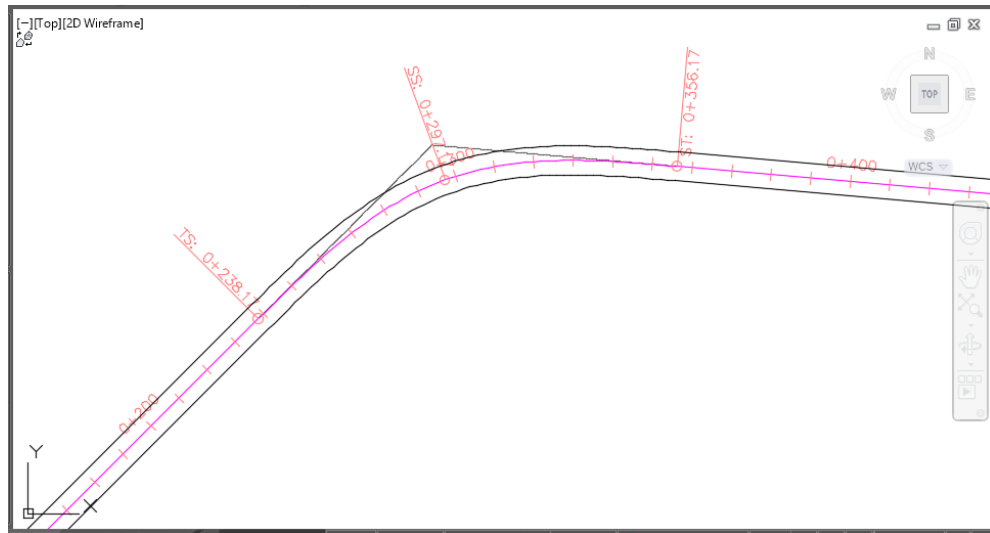


Figura 11 Alineamiento de una curva.
Fuente: Elaboración autores

Se deben generar los bordes y centro de los carriles:

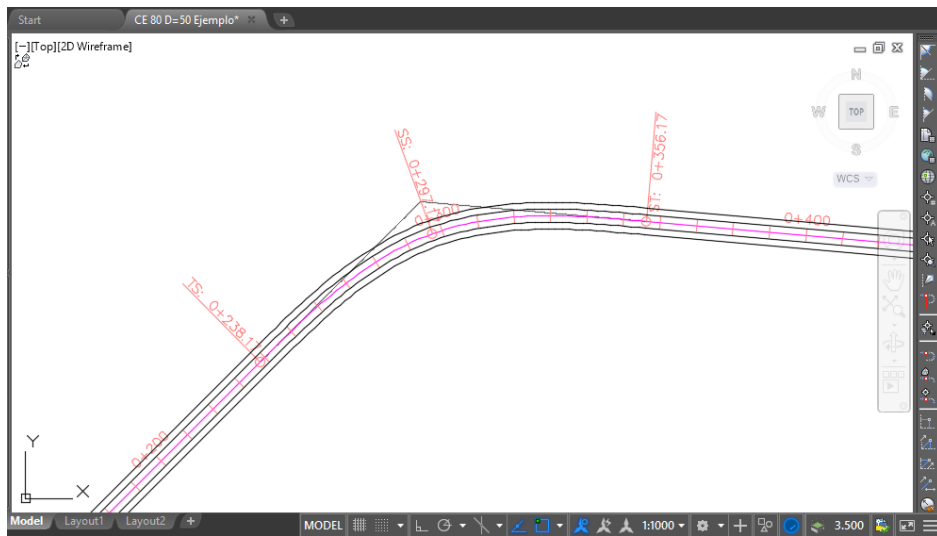


Figura 12 Bordes y centro del Carril.
Fuente: Elaboración autores

En efecto, se debe definir el vehículo tipo, dado que el proyecto de estudio corresponde al vehículo C3S2 por qué se debe dejar los parámetros de dibujo por defecto:

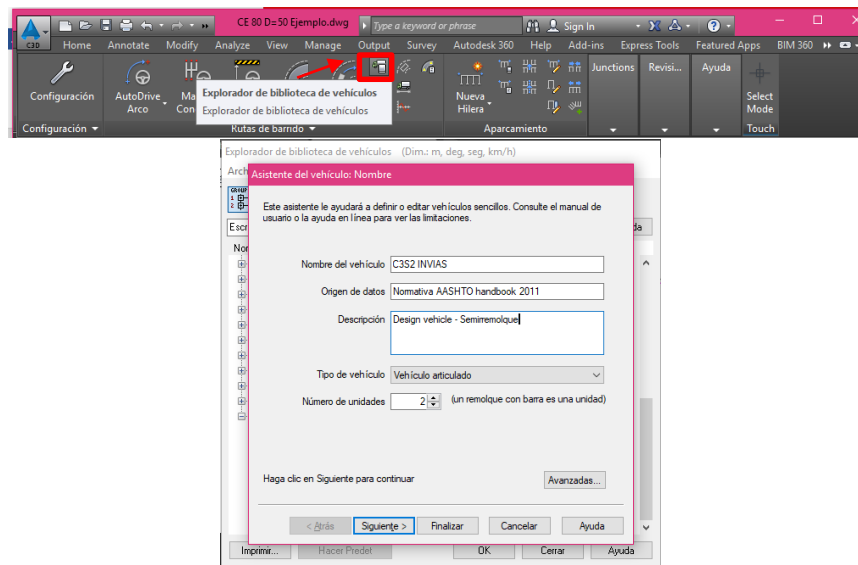


Figura 13 Ajustes de vehículo al software.
Fuente: Elaboración autores

De acuerdo a lo anterior, se configura el vehículo con las longitudes de un vehículo articulado:

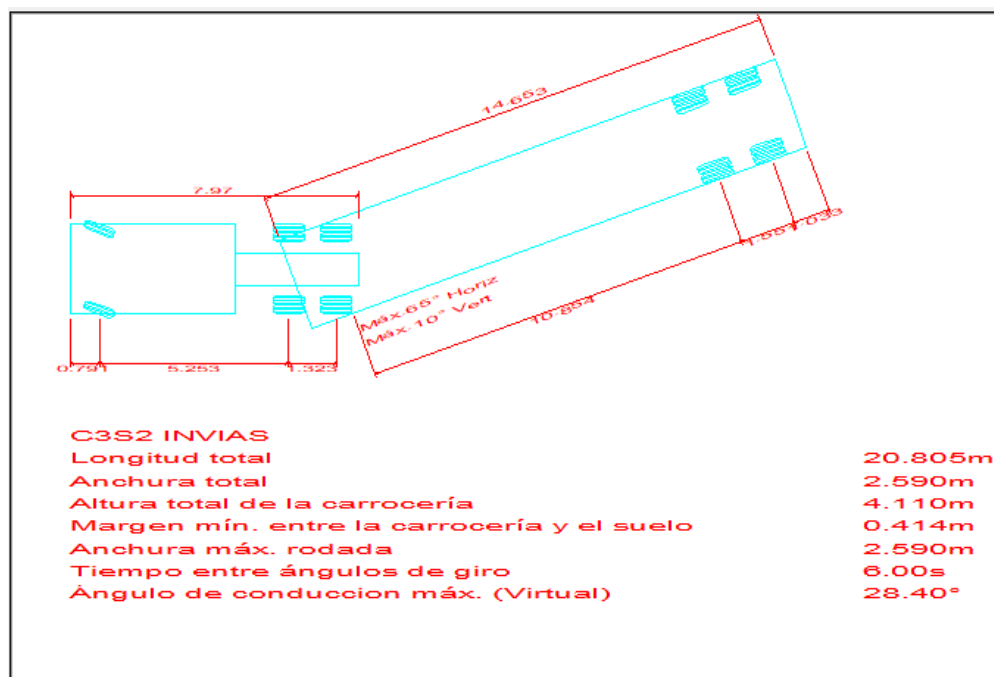


Figura 14 Datos de vehículos C3S2 ingresado al software Vehicle Tracking
Fuente: Elaboración autores.

Nombre de la unidad:	C3S2 INVIAS Unidad tractora
Tipo:	Unidad tractora (con conducción controlada por conductor)
Estilo de carrocería:	Vehículo tractor articulado (Cabina con litera grande)
Clasificación	Autodesk
Fuente:	AASHTO handbook 2001
Descripción:	Design vehicle
Notas:	
Dato:	Eje principal delantero
Eje(s) delantero(s):	1 Ackerman (ejes fijos, ruedas girando)
Excentricidad del eje delantero principal:	0.000m
Excentricidad real del eje delantero	0.000m (Cálculo automático)
Ángulo máximo de la rueda:	28.400deg (Cualquier rueda delantera)
Estado:	Activo No autodirigido
Anchura de rodada:	2.480m
Ruedas totales:	2 (situado en los extremos del eje)
Anchura de neumático:	0.248m (Cálculo automático - proporción de anchura de rodada)
Diámetro del neumático:	0.868m (Cálculo automático - proporción de anchura de rodada)
Eje(s) trasero(s):	2 Fijo (Todos los ejes idénticos)
Excentricidad del eje trasero principal:	5.253m (Eje más interno detrás de Eje principal delantero)
Excentricidad real del eje trasero	5.915m (Cálculo automático)
Ángulo máximo de la rueda:	Ilimitado
Espaciamiento del eje trasero:	1.323m
Estado:	Activo No autodirigido
Anchura de rodada:	2.480m
Ruedas totales:	4 (situado en los extremos del eje)
Anchura de neumático:	0.248m (Cálculo automático - proporción de anchura de rodada)
Diámetro del neumático:	0.868m (Cálculo automático - proporción de anchura de rodada)
Conducción:	Eje(s) delantero(s):
Ángulo máximo virtual de dirección:	28deg
Tiempo entre ángulos de giro (Avan./At):	6.0seg / 6.0seg
Conductor / Piloto	
Desfase longitudinal del conductor:	-0.709m (delante de Eje principal delantero)
Desfase lateral del conductor / piloto:	-0.600m (A la derecha del eje central)
Altura del conductor:	2.250m (Sobre el nivel del suelo)
Acoplamiento delantero:	None
Acoplamiento trasero:	Genérico
Desfase del acoplamiento:	6.576m (detrás de Eje principal delantero)
Altura de acoplamiento:	0.868m (Cálculo automático - proporción de diámetro de neumático)
Capacidad:	Puede remolcar o ser remolcado
Máx. Ángulo de articulación horizontal:	65.000deg
Máx. Ángulo de articulación vertical:	10.000deg
Esquema de carrocería (planta):	
Tipo de esquema:	Carrocería tractora

Figura 15 Datos de vehículos de Vehicle Tracking_C3S2

Fuente: Elaboración autores

Tras establecer el vehículo de diseño se procede a activar el recorrido con la opción AutoDrive Arco.

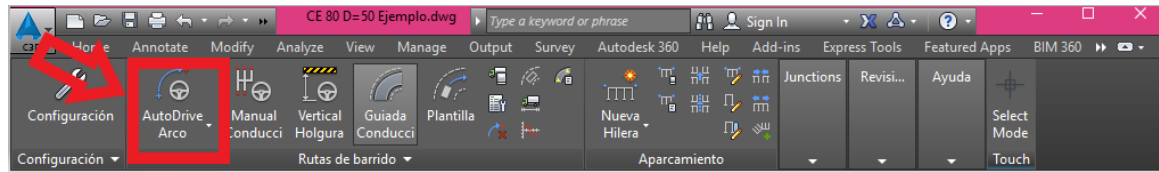


Figura 16 Icono AutoDrive Arco.
Fuente: Elaboración autores

Al dar click Figura 16 Icono AutoDrive Arco., se debe ubicar en el tramo recto y dar click en “seguir” dirigiéndolo en el sentido de flujo de la vía:

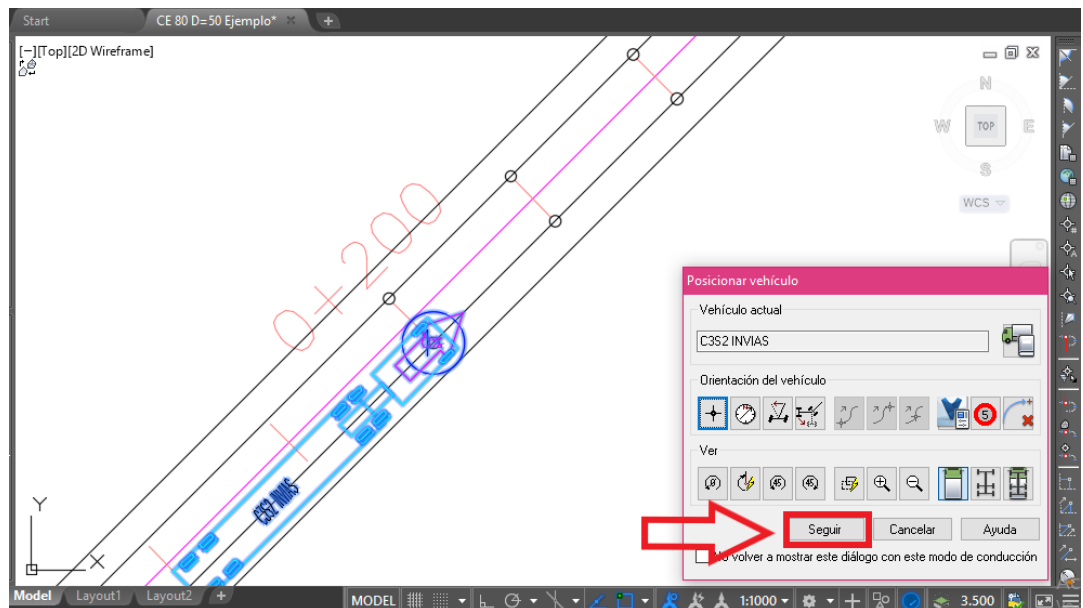


Figura 17 Vehículo diRígido
Fuente: Elaboración autores

Se traza el resto de puntos del recorrido por el centro del carril para definir la ruta del vehículo de modo manual en ambos sentidos:

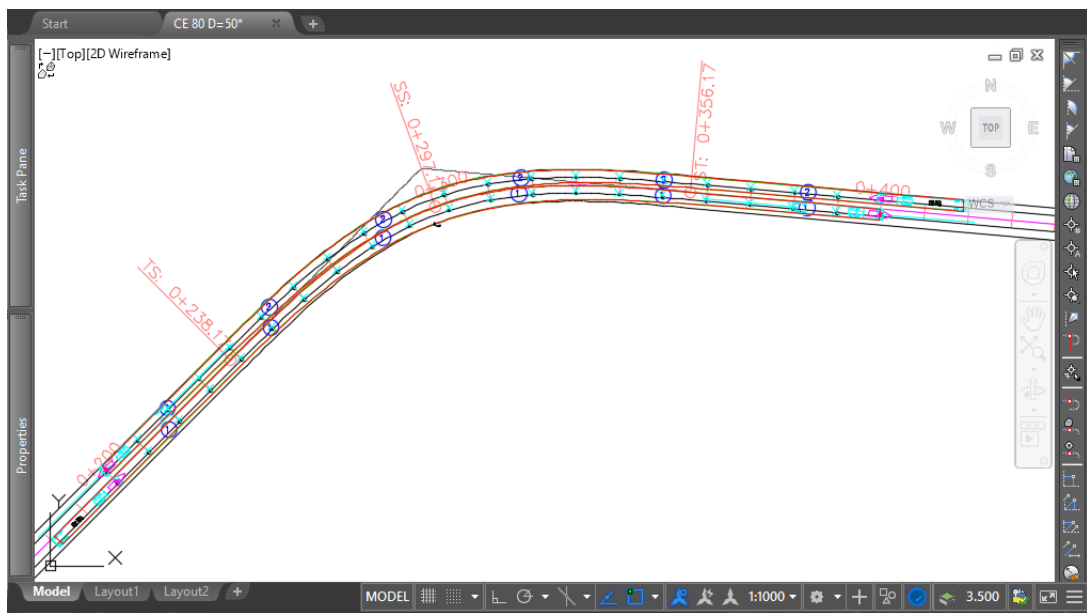


Figura 18 Trazado del Vehículo C3S2 ambos sentidos.
Fuente: Elaboración autores

Al ampliar el centro de la curva se deben mover los dos recorridos de tal forma que coincidan con el eje de la vía en el centro de la curva:

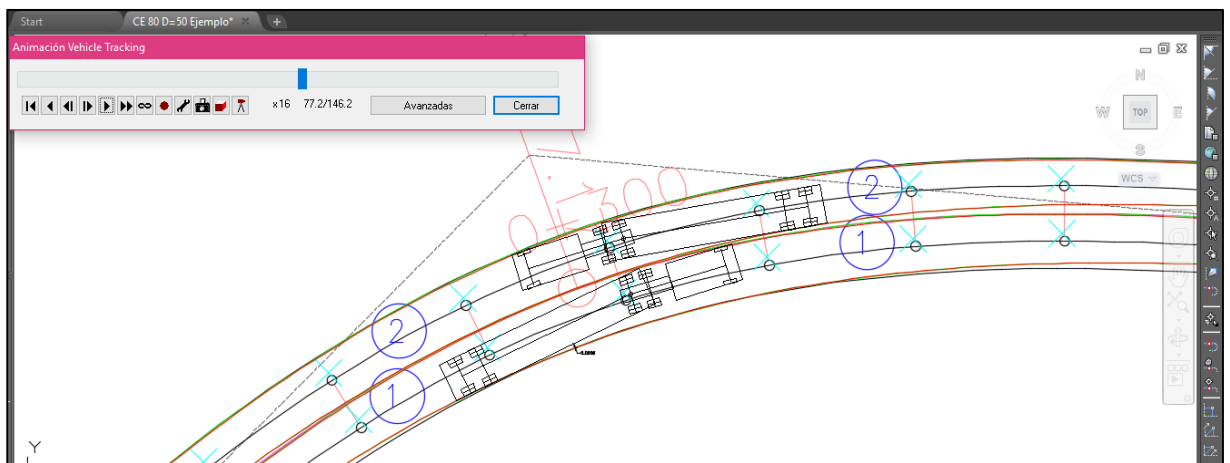


Figura 19 Animación recorrido del vehículo.
Fuente: Elaboración autores

Se determina el sobreancho requerido como resultado final de las modelaciones:

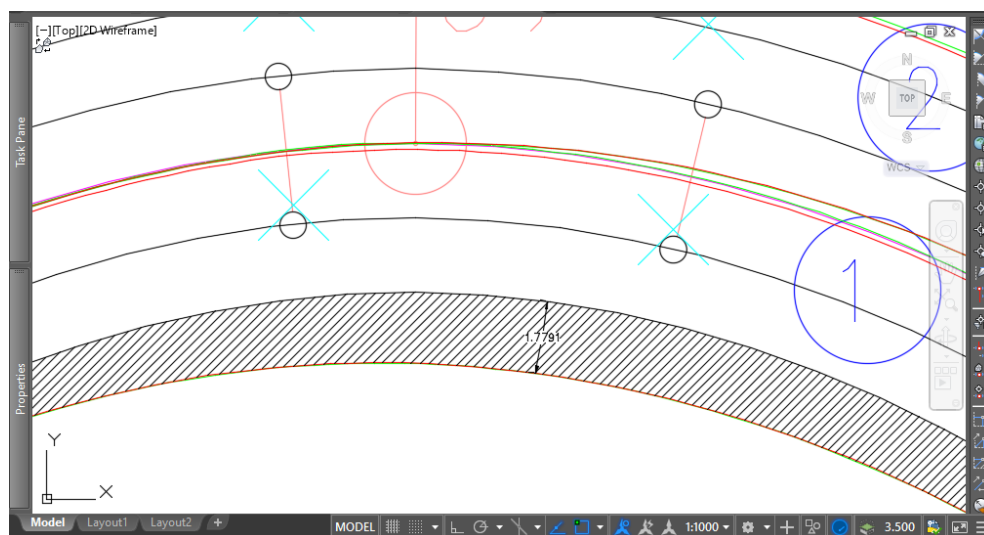


Figura 20 Evaluación del Sobreancho.

Fuente: Elaboración autores

8.2.3. Simulaciones de pruebas piloto.

Uno de los propósitos de las modelaciones es establecer el sobreancho real requerido definido por vehículos de prueba que son alquilados para tal fin, por lo que se desarrollará de la siguiente manera:

- Caracterización física del vehículo.

Una vez llevada a cabo la caracterización física del vehículo C3S2 a emplear, deberá cumplir como mínimo las siguientes características: Vehículo articulado, denominado tracto-camión de tres ejes con un semirremolque de dos ejes.

- Levantar las dimensiones del vehículo.

Se dispone del vehículo pruebas piloto, en posición recta de parqueo, en el cual se medirá de acuerdo a los parámetros establecidos para tractocamión, teniendo en cuenta los parámetros establecidos en el manual de diseño geométrico del 2008 para el diseño de sobreanchos. Es decir, se medirá de acuerdo a las dimensiones requeridas para el cálculo del ancho adicional de calzada.

- Sitio seleccionado para la prueba piloto.

El lugar seleccionado para la prueba pruebas piloto es el Restaurante el Botalón – ruta del sol ubicado en la vereda Bocademonte de Lajas, Caparrapí. Cundinamarca.



Figura 21. KMZ, Localización sitio de prueba.

Fuente: Google Earth

- Levantamiento Topográfico

Se procede a la elaboración en terreno de las dos curvas (espiral – espiral y espiral – círculo – espiral) seleccionadas de acuerdo a lo desarrollado en la fase anterior tomando los resultados obtenidos tras la simulación en el software del vehículo C3S2 por norma, teniendo en cuenta equipo topográfico para el trazado en el área elegida para las maniobras.

Se toman las coordenadas reales y puntos de amarre georreferenciados de cada curva, por lo que se procedió a realizar el levantamiento



Figura 22. KMZ, Localización para implementación de topografía.

Fuente: Google Earth

- Demarcación de recorrido del vehículo.

Para garantizar la demarcación de recorrido del vehículo por las dos curvas espiral – espiral y espiral – círculo – espiral se realizará por medio de cuerda de colores teniendo en cuenta la topografía y se extenderá lona verde anclada al suelo desde el punto de arranque y se regará cal para el demarcado de recorrido, sin embargo el terreno se encuentra en tierra lo que facilita dicha demarcación para la realización del recorrido.

Se procede a realizar simulación pruebas piloto en función a las velocidades de diseño, ángulos de deflexión y radios de giro

- Toma de datos.

Tras realizar el levantamiento pruebas piloto se procede a realizar las modelaciones en el software Autodesk®Vehicle Tracking.

8.2.4. Simulaciones en el Software Vehicle Tracking – Tractocamión Actual

Tras efectuar los cálculos en función a los requisitos expuestos por el INVIAS tal como se muestran en el Anexo 1. Modelaciones vehículo INVIAS, se realizan las respectivas modelaciones en donde se plasmarán las dos curvas en estudio, para tal fin, se obtendrá los sobreanchos de acuerdo a las medidas obtenidas en la fase de prueba piloto, con el fin de generar resultados comparables bajo las mismas premisas de cálculo.

8.3. Fase 3 – ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se realiza un análisis estadístico a partir de los resultados obtenidos por medio de los conjuntos de modelaciones generadas para cada variable independiente empleando el Software, y las simulaciones en la prueba piloto.

Se dispone la realización de una propuesta de ábaco o fórmula para establecer el sobreancho de acuerdo a los vehículos.

Por último se realiza una comparación entre los métodos y formulaciones expuestos en el Manual de Diseño Geométrico de 2008, así como los resultados obtenidos por medio del empleo de un software especializado para determinar el sobreancho mínimo, con el fin de determinar similitudes y/o diferencias entre las dos metodologías planteadas.

9. CARACTERIZACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL CAMIÓN DE DISEÑO

De acuerdo a lo definido en la Resolución 4100 de 2004 del Ministerio de Transporte en la cual establece las dimensiones de los vehículos de transporte de carga en el artículo 7²⁶ así:

Designación	Dimensiones		
	Ancho máximo, m	Altura máxima, m	Longitud máxima, m
2	2,60	4,40	10,80
3	2,60	4,40	12,20
4	2,60	4,40	12,20
2S1	2,60	4,40	18,50
2S2	2,60	4,40	18,50
2S3	2,60	4,40	18,50
3S1	2,60	4,40	18,50
3S2	2,60	4,40	18,50
3S3	2,60	4,40	18,50
2R2	2,60	4,40	18,50
3R2	2,60	4,40	18,50
4R2	2,60	4,40	18,50
2R3	2,60	4,40	18,50
3R3	2,60	4,40	18,50
4R3	2,60	4,40	18,50
4R4	2,60	4,40	18,50
2B1	2,60	4,40	18,50

Figura 23. Tabla de dimensiones.

Fuente: Resolución 4100 de 28 de diciembre de 2004.

En el manual de diseño geométrico del 2008 se define que el vehículo representativo del parque automotor para el diseño de sobreanchos es:

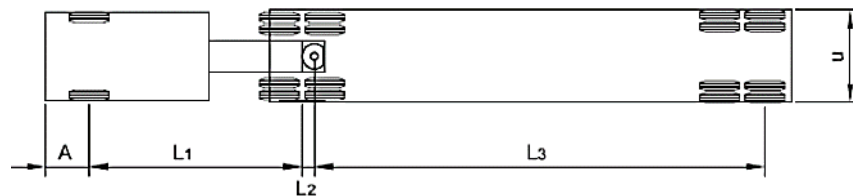


Figura 24. Vehículo C3S2 dimensiones.

Fuente: Manual de diseño geométrico 2008, INVIAS.

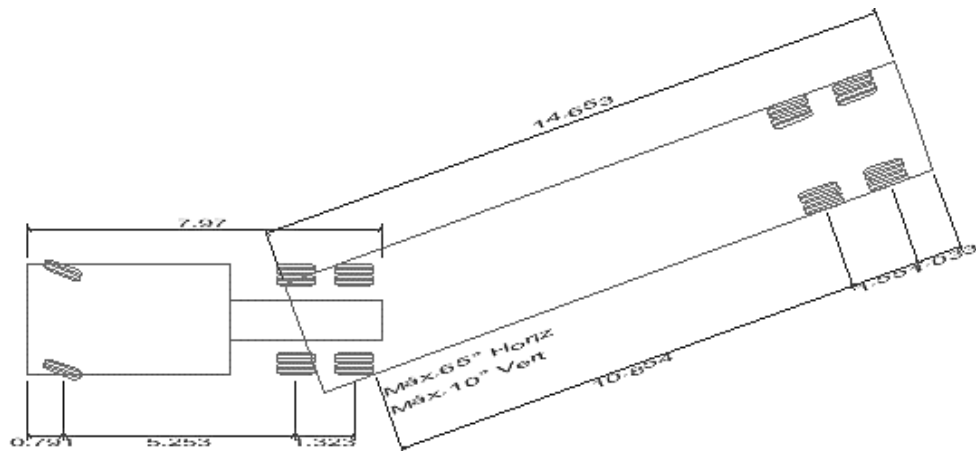
²⁶ Ministerio de transporte. Resolución 4100 de 2004 emitida el 28 de diciembre de 2004. Colombia. MINTRANSPORTE

Cuyas dimensiones corresponden a:

Tabla 3 Dimensiones del vehículo C3S2

Vehículo	Categoría	A (m)	L ₁ (m)	L ₂ (m)	L ₃ (m)	L ₄ (m)
C3S2	Tractocamión de tres ejes con semirremolque de dos ejes	1,22	5,95	0,00	12,97	2,59

Fuente: Manual de diseño geométrico 2008.



C3S2 INVIAS

Longitud total	20.805m
Anchura total	2.590m
Altura total de la carrocería	4.110m
Margen mín. entre la carrocería y el suelo	0.414m
Anchura máx. rodada	2.590m
Tiempo entre ángulos de giro	6.00s
Ángulo de conducción máx. (Virtual)	28.40°

Figura 25. Vehículos C3S2 - INVIAS

Fuente: Elaboración autores.

Durante el desarrollo de la investigación se planteó efectuar un análisis y caracterización de los vehículos de carga que transitan frecuentemente en el territorio colombiano, donde se determinó que la longitud total del vehículo C3S2 discrepan tanto por el Ministerio de Transporte como por el INVIAS; motivo por el cual se realiza la medición de sección de algunos vehículos, encontrando gran similitud con lo expuesto por Cañón en 2018 en el documento "RADIOS DE GIRO EN CAMIONES ARTICULADOS PARA DISEÑO VIAL URBANO EN COLOMBIA", en donde se enuncia que pese a la comparación de dimensiones de vehículos C3S2

de diferentes marcas “es imposible estandarizar los semirremolques y la longitud total de éste vehículo”²⁷.

A partir de esta premisa se evidenció que el tráiler presenta dimensiones casi iguales para varios vehículos indistintamente de su marca y número de ejes, en donde la diferencia se da en el semirremolque, siendo esta última sección el componente más crítico a la hora de análisis de sobreancho y a su vez es de difícil estandarización debido a que las cargas son variables en función al producto transportado.

Es decir que presentan diferente longitud total sumado a las transformaciones que han presentado los vehículos en su semirremolque o contemplan carga de ancho adimensional, por lo anterior se realizó un levantamiento de las longitudes de los vehículos de carga tal como se presente a continuación:

Tabla 4 Dimensiones de vehículos pruebas piloto

Vehículo	Categoría	Ancho frontal (m)	Ancho semirremolque (m)	Longitud total (m)
C3S3 Tipo camabaja	Tractocamión de tres ejes con semirremolque de tres ejes	2,60	2,62	17,94
C3S3	Tractocamión de tres ejes con semirremolque de tres ejes	2,35	2,54	16,85
C3S2 Tipo camabaja con carga	Tractocamión de tres ejes con semirremolque de dos ejes	2,60	4,75	20,30
C3S2 Tipo camabaja sin carga	Tractocamión de tres ejes con semirremolque de dos ejes	2,60	2,50	20,30

Fuente: Elaboración autores.

²⁷ CAÑÓN Buitrago, Elkin Darío; 2018 Radios de giro en camiones articulados para diseño vial urbano en Colombia, Universidad Santo Tomás, 123p.



Figura 26. Vehículo C3S3 Tipo camabaja
Fuente: autores.

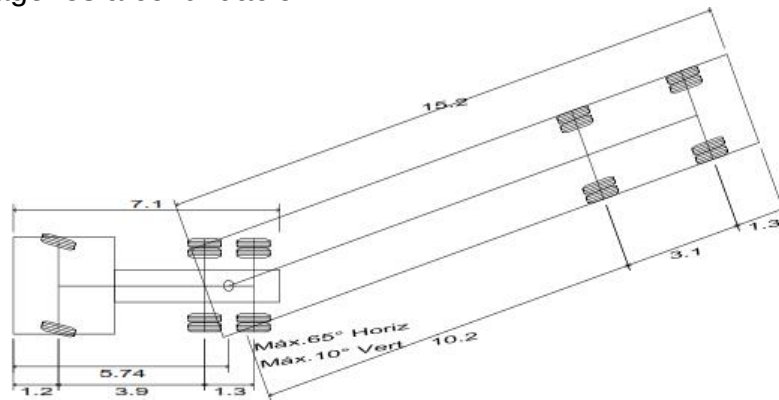


Figura 27. Vehículo C3S3
Fuente: autores.



Figura 28. Vehículo C3S2 Tipo camabaja
Fuente: Autores.

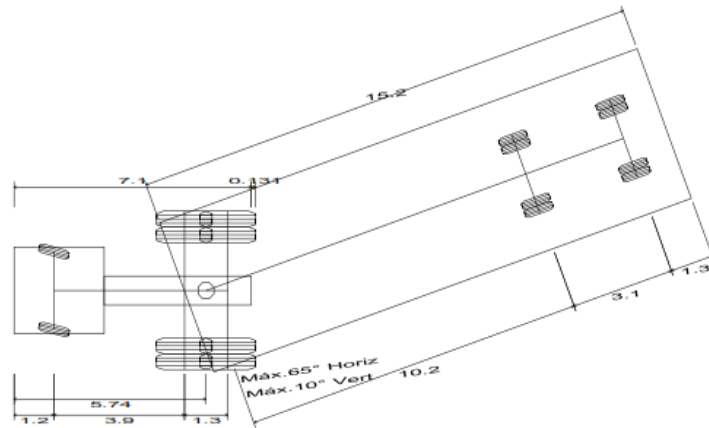
De acuerdo a la Tabla 4 Dimensiones de vehículos pruebas piloto se puede comprobar que los anchos de cada tractocamión son variables, debido a que existe un atenuante importante que incide de manera directa en el cálculo de los sobreanchos y se debe al ancho de la carga que lleva cada semirremolque ya que para los giros de los vehículos en las curvas se debe maniobrar este espacio aumentando considerablemente el sobreancho requerido tal como se evidencia en las imágenes a continuación:



C3S2 CAMPO SIN CARGA

Longitud total	20.340m
Anchura total	2.600m
Altura total de la carrocería	4.110m
Margen mín. entre la carrocería y el suelo	0.423m
Anchura máx. rodada	2.600m
Tiempo entre ángulos de giro	6.00s
Ángulo de conducción máx. (Virtual)	28.40°

Figura 29. Vehículo C3S2.
Fuente: Elaboración autores.



C3S2 CAMPO CON CARGA

Longitud total	20.340m
Anchura total	4.750m
Altura total de la carrocería	4.110m
Margen mín. entre la carrocería y el suelo	0.686m
Anchura máx. rodada	4.750m
Tiempo entre ángulos de giro	6.00s
Angulo de conduccion máx. (Virtual)	28.40°

Figura 30 Vehículo C3S2 con carga.
Fuente: Elaboración autores.

10. CÁLCULOS Y MODELACIONES DE SOBREANCHOS

Para efectuar el análisis comparativo entre los resultados obtenidos para el cálculo del sobreancho teniendo en cuenta lo enunciado y propuesto por el Manual de Diseño Geométrico de 2008, para los dos prototipos de vehículos presentados, es decir rígido y articulado, los cuales se confrontaran con los resultados obtenidos de las modelaciones efectuadas de manera computacional a través del software Vehicle Tracking y las realizadas en la prueba piloto, teniendo en cuenta las dimensiones del vehículo C3S2 enunciado en el numeral 9.

Los cálculos y valores obtenidos para el sobreancho a través de cada una de las fases efectuadas para las dos clases de curvas en estudio (espiral – espiral y espiral – círculo – espiral) teniendo en cuenta el Anexo 2. Cálculos por tipo de curva se presentan a continuación.

10.1. Cálculos Manual de Diseño Geométrico 2008

Los cálculos y valores se presentan por medio de tablas, los valores obtenidos para el sobreancho en función a la deflexión y velocidad planteada, es importante citar que se tomaron valores de deflexión que varían de 20° a 120° y velocidades de 40 km/h a 100 km/h, y a su vez con los radios mínimos y longitudes de espiral mínimas planteadas por el manual del INVIAS para cada una de las deflexiones y velocidades descritas, teniendo en cuenta el tipo de perfil de terreno y las condiciones topográficas con las que cuenta el territorio colombiano y en la que actualmente se llevan a cabo los proyectos más relevantes de infraestructura vial del país.

Estos cálculos, fueron efectuados con base en las formulaciones y expresiones planteadas por el manual de diseño geométrico de 2008 del INVIAS, el cual es el actualmente empleado como lineamiento base para el desarrollo de la infraestructura vial en Colombia, dichas expresiones son descritas en capítulos anteriores del presente documento de investigación.

10.1.1. Curva Espiral – Espiral (EE)

Tabla 5 Valor de Sobreancho INVIAS Curva EE – Vehículo Rígido

SOBREANCHOS - CALCULADOS (RIGIDOS)											
Deflexión (°) Velocidad (km/h)	20.0	30.0	40.0	50.0	60.0	70.0	80.0	90.0	100.0	110.0	120.0
40	0.62	0.93	1.25	1.57	1.89	2.21	2.55	2.88	3.23	3.58	3.95
50	0.59	0.88	1.18	1.48	1.79	2.09	2.40	2.72	3.05	3.38	3.72
60	0.46	0.69	0.91	1.15	1.38	1.61	1.85	2.09	2.33	2.57	2.82
70	0.41	0.62	0.83	1.04	1.25	1.46	1.67	1.89	2.10	2.32	2.55
80	0.38	0.57	0.76	0.95	1.14	1.33	1.53	1.72	1.92	2.12	2.32
90	0.35	0.53	0.71	0.89	1.07	1.25	1.43	1.61	1.80	1.98	2.17
100	0.33	0.50	0.67	0.84	1.00	1.17	1.34	1.51	1.69	1.86	2.03

Fuente: Elaboración Autores

Tabla 6 Valor de Sobreancho INVIAS Curva EE – Vehículo Articulado

SOBREANCHOS - CALCULADOS (ARTICULADOS)											
Deflexión (°) Velocidad (km/h)	20.0	30.0	40.0	50.0	60.0	70.0	80.0	90.0	100.0	110.0	120.0
40	3.37	5.23	7.17	9.21	11.42	13.87	16.70	20.18	25.08	-	-
50	3.18	4.94	6.76	8.67	10.71	12.95	15.46	18.43	22.24	28.25	-
60	2.41	3.76	5.13	6.54	8.01	9.54	11.16	12.91	14.83	16.98	19.50
70	2.17	3.39	4.63	5.89	7.19	8.54	9.96	11.45	13.06	14.80	16.74
80	1.97	3.08	4.21	5.36	6.53	7.75	9.00	10.31	11.70	13.18	14.78
90	1.83	2.88	3.93	5.00	6.09	7.21	8.37	9.57	10.82	12.15	13.56
100	1.71	2.69	3.68	4.68	5.70	6.74	7.82	8.92	10.07	11.28	12.55

Fuente: Elaboración Autores

Como se evidencia, los valores arrojados de acuerdo a las formulaciones planteadas por el INVIAS en su manual de diseño geométrico indican una clara tendencia: en función del aumento de la deflexión el valor del sobreancho incrementa para cada una de las velocidades, y a su vez, si se toma como variable independiente la velocidad se evidencia que para la misma deflexión el valor de sobreancho disminuye a medida que se incrementa la velocidad, siendo estas tendencias constantes para los dos tipos de vehículos contemplados en el manual de diseño de 2008.

Igualmente se evidencia que los resultados arrojados para las diferentes tipologías de vehículos difieren en gran medida entre sí una vez que para el vehículo rígido se obtiene un valor máximo de 3.95m (dado para una deflexión de 120° y una velocidad de 40 km/h), mientras que para el caso del sobreancho calculado bajo las premisas de un vehículo articulado el valor máximo de sobreancho es de 28.25m (dado para una deflexión de 110° y velocidad de 40 km/h).

10.1.2. Curva Espiral – Circulo – Espiral (ECE)

Tabla 7 Valor de Sobreancho INVIAS Curva ECE – Vehículo Rígido

SOBREANCHOS - CALCULADOS (RIGIDOS)											
Deflexión (°) Velocidad (km/h)	20.0	30.0	40.0	50.0	60.0	70.0	80.0	90.0	100.0	110.0	120.0
40	0.62	0.93	1.25	1.57	1.89	2.21	2.55	2.88	3.23	3.58	3.95
50	0.59	0.88	1.18	1.48	1.79	2.09	2.40	2.72	3.05	3.38	3.72
60	0.46	0.69	0.91	1.15	1.38	1.61	1.85	2.09	2.33	2.57	2.82
70	0.41	0.62	0.83	1.04	1.25	1.46	1.67	1.89	2.10	2.32	2.55
80	0.38	0.57	0.76	0.95	1.14	1.33	1.53	1.72	1.92	2.12	2.32
90	0.35	0.53	0.71	0.89	1.07	1.25	1.43	1.61	1.80	1.98	2.17
100	0.33	0.50	0.67	0.84	1.00	1.17	1.34	1.51	1.69	1.86	2.03

Fuente: Elaboración Autores

Tabla 8 Valor de Sobreancho INVIAS Curva ECE – Vehículo Articulado

SOBREANCHOS - CALCULADOS (ARTICULADOS)											
Deflexión (°) Velocidad (km/h)	20.0	30.0	40.0	50.0	60.0	70.0	80.0	90.0	100.0	110.0	120.0
40	3.37	5.23	7.17	9.21	11.42	13.87	16.70	20.18	25.08	-	-
50	3.18	4.94	6.76	8.67	10.71	12.95	15.46	18.43	22.24	28.25	-
60	2.41	3.76	5.13	6.54	8.01	9.54	11.16	12.91	14.83	16.98	19.50
70	2.17	3.39	4.63	5.89	7.19	8.54	9.96	11.45	13.06	14.80	16.74
80	1.97	3.08	4.21	5.36	6.53	7.75	9.00	10.31	11.70	13.18	14.78
90	1.83	2.88	3.93	5.00	6.09	7.21	8.37	9.57	10.82	12.15	13.56
100	1.71	2.69	3.68	4.68	5.70	6.74	7.82	8.92	10.07	11.28	12.55

Fuente: Elaboración Autores

De acuerdo con lo enunciado y propuesto por el manual de diseño geométrico del INVIAS, se plantea una única de formulación de sobreancho independientemente del tipo de curva que se esté analizando, es decir los parámetros empleados actualmente para el cálculo de este valor no son función del tipo de curva a diseñar. Una vez que las diferentes variables ingresadas a las formulaciones son las mismas los resultados arrojados son iguales a los descritos para las curvas Espiral – Espiral mostrados anteriormente.

10.2. Modelaciones Vehicle Tracking

Con el fin de efectuar las modelaciones en el software Vehicle Tracking, se siguieron los lineamientos planteados a lo largo de esta investigación, es decir se definió como vehículo de circulación un camión C3S2 con las dimensiones planteadas en el manual de Diseño Geométrico de 2008, el cual se proyectó sobre una serie de curvas diseñadas con base en las diferentes deflexiones y velocidades de análisis, teniendo en cuenta los requerimientos de radios y longitudes de espirales mínimas descritas por el INVIAS.

Dado lo anterior, y teniendo en cuenta que en esta investigación se abarca la determinación del sobreancho para dos tipologías de curvas (espiral-espiral y espiral-circulo-espiral) se trazaron los ejes de la calzada, y a partir de este se trazó hacia cada costado y con una separación de 3.65m se plasmaron los bordes de carril con el fin de obtener una calzada de tránsito bidireccional (un carril en cada sentido), y a partir de ello se siguieron los pasos indicados en el numeral 8.2.2, de manera que fuera posible obtener el valor de sobreancho para cada curva efectuada de acuerdo a lo reportado en las siguientes tablas:

Tabla 9 Valor de Sobreancho Modelaciones Curva EE – Vehículo C3S2

SOBREANCHOS - MODELACIONES											
Deflexión (°) Velocidad (km/h)	20.0	30.0	40.0	50.0	60.0	70.0	80.0	90.0	100.0	110.0	120.0
40	0.00	0.00	0.22	0.58	0.91	1.28	1.62	2.13	2.49	2.87	3.49
50	0.00	0.00	0.16	0.48	0.84	1.20	1.58	1.97	2.37	2.71	3.20
60	0.00	0.00	0.00	0.23	0.49	0.76	1.09	1.40	1.65	1.97	2.29
70	0.00	0.00	0.00	0.11	0.37	0.64	0.92	1.19	1.44	1.77	2.02
80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.25	0.52	0.78	1.00	1.24	1.54	1.78
90	0.00	0.00	0.00	0.00	0.19	0.43	0.67	0.89	1.13	1.37	1.65
100	0.00	0.00	0.00	0.00	0.12	0.35	0.58	0.78	1.02	1.23	1.48

Fuente: Elaboración Autores

Tabla 10 Valor de Sobreancho Modelaciones Curva ECE – Vehículo C3S2

SOBREANCHOS ESPIRAL-CIRCULO-ESPIRAL - MODELACIONES											
Deflexión (°) Velocidad (km/h)	20.0	30.0	40.0	50.0	60.0	70.0	80.0	90.0	100.0	110.0	120.0
40	No es posible efectuar la curva	No es posible efectuar la curva	No es posible efectuar la curva	No es posible efectuar la curva	No cumple	No cumple	No cumple	1.05	1.11	1.13	1.14
50	No es posible efectuar la curva	No cumple	No cumple	No cumple	0.13	0.16	0.21	0.19	0.20	0.39	0.33
60	No es posible efectuar la curva	No cumple	No cumple	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
70	No cumple	No cumple	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
80	No cumple	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
90	No cumple	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
100	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Fuente: Elaboración Autores

Como se evidencia en la Tabla 9 Valor de Sobreancho Modelaciones Curva EE – Vehículo C3S2 y Tabla 10 Valor de Sobreancho Modelaciones Curva ECE – Vehículo C3S2, se presentan valores de sobreancho en cero, lo cual implica que para la velocidad y la deflexión evaluada no se hace necesario contar con una longitud adicional hacia la parte interna de la curva adicional a la contemplada en el ancho del carril, una vez que la huella que marca el semirremolque no supera los límites definidos por el diseño geométrico base.

Para el caso de las modelaciones efectuadas en curvas espiral – espiral, se evidencia que para todas las velocidades evaluadas, para las deflexiones de 20° y 30° no se hace necesario contar con un parámetro de sobreancho y que solo a partir de una deflexión de 60° para todas las velocidades de diseño se requiere contar con un valor de sobreancho. Se evidencia que para una misma deflexión a medida que incrementa la velocidad de diseño el sobreancho necesario se hace menor, esto se da una vez que en función del incremento de la velocidad el radio de curva es mayor, lo que mejora las condiciones de maniobrabilidad y eficacia a la hora de efectuar el giro por parte de los vehículos de gran envergadura. Adicionalmente, tras efectuar las modelaciones se logra evidenciar que para una misma velocidad a medida que incrementa el ángulo de deflexión de la curva se hace necesario un mayor sobreancho.

Adicionalmente, para el caso de las modelaciones efectuadas en curvas tipo espiral – círculo – espiral, se puede contar con cuatro condiciones diferentes, las cuales se describen a continuación:

- Para las deflexiones de 20° con velocidades de 40km/h a 60km/h y velocidad de 40 km/h entre deflexiones de 30° a 50°, se presenta la nota: “No es posible efectuar la curva”, esto una vez que las curvas plasmadas en el software corresponden curvas simétricas, en ese sentido la longitud de la espiral sumada a la longitud del radio de curvatura es superior al alineamiento planteado lo que genera que la curva no pueda ser trazada en el civil.
- Adicionalmente, se observa la nota “No cumple” la cual se presenta para las deflexiones de 20° a 80° y velocidades de 40 a 90 (ver Tabla 10 Valor de Sobreancho Modelaciones Curva ECE – Vehículo C3S2), esta anotación se debe a que en el momento de efectuar la verificación de longitud en el programa Civil, el segmento correspondiente a la zona circular presenta una longitud de curva inferior a la calculada y requerida de acuerdo a lo estipulado en las formulaciones del manual de Diseño Geométrico del INVIAS de 2008. Es por ello que esta serie de curvas no son tenidas en cuenta para la ejecución de modelaciones y obtención de sobreancho por este medio.
- Al igual que en el caso de las curvas espirales, en esta tipología de curvas se evidencia que para la mayoría de las velocidades no es necesario contar

con una longitud adicional al ancho de carril para que un camión C3S2 circule de manera adecuada dentro de la vía. Esto se da una vez que este tipo de curva es un poco más abierta y suave que las curvas espirales lo que facilita la circulación de vehículos de grandes dimensiones.

- En la Tabla 10 Valor de Sobreancho Modelaciones Curva ECE – Vehículo C3S2, solo es necesario contar con sobreancho en curvas diseñadas a bajas velocidades y grandes ángulos de deflexión, siendo el sobreancho máximo de 1.14 (hallado en un ángulo de deflexión de 20° y velocidad de 40km/h) y mínimo sobreancho de 0.13m (hallado en un ángulo de deflexión de 60° y velocidad de 50km/h).

10.3. Modelaciones en prueba piloto

Las modelaciones en la prueba piloto, se efectuaron para dos curvas específicas, una vez que el objetivo de esta es comparar los resultados obtenidos con los cálculos efectuados bajo la metodología INVIAAS y los obtenidos tras las modelaciones computacionales efectuadas., para determinar las curvas que se iban a implantar pruebas piloto se efectuaron los siguientes pasos:

1. Tras contar con los valores de sobreancho obtenidos bajo la normativa INVIAAS y los obtenidos de las modelaciones efectuadas en el software vehicle tracking se realizó un comparativo por medio de diferencias porcentuales para cada tipo de curva y para cada una de las tipologías de vehículos enunciadas en el manual de Diseño Geométrico (rígidos y articulados tal y como se puede evidenciar en las siguientes tablas.

Tabla 11 Diferencias Porcentuales de Sobreancho Modelaciones vs. Calculo INVIAS Vehículo Rígido – Curva EE

DIFERENCIAS PORCENTUALES - SOBREANCHOS MODELACIÓN Vs. CALCULO RÍGIDOS											
Deflexión (°) Velocidad (km/h)	20.0	30.0	40.0	50.0	60.0	70.0	80.0	90.0	100.0	110.0	120.0
40	0%	0%	567%	271%	208%	173%	157%	135%	130%	125%	113%
50	0%	0%	761%	310%	212%	175%	153%	138%	129%	125%	116%
60	0%	0%	0%	507%	283%	211%	170%	149%	141%	130%	123%
70	0%	0%	0%	928%	338%	229%	181%	159%	146%	131%	126%
80	0%	0%	0%	118745%	457%	258%	197%	173%	155%	138%	130%
90	0%	0%	0%	0%	554%	290%	212%	182%	158%	145%	131%
100	0%	0%	0%	0%	868%	333%	233%	195%	165%	151%	137%

Fuente: Elaboración Autores

Tabla 12 Diferencias Porcentuales de Sobreancho Modelaciones vs. Calculo INVIAS Vehículo Articulado – Curva EE

DIFERENCIAS PORCENTUALES - SOBREANCHOS MODELACIÓN Vs. CALCULO ARTICULADO											
Deflexión (°) Velocidad (km/h)	20.0	30.0	40.0	50.0	60.0	70.0	80.0	90.0	100.0	110.0	120.0
40	0%	0%	3251%	1592%	1256%	1084%	1028%	946%	1006%	-	-
50	0%	0%	4353%	1814%	1273%	1082%	982%	936%	940%	1044%	-
60	0%	0%	0%	2894%	1646%	1248%	1025%	919%	898%	861%	852%
70	0%	0%	0%	5266%	1948%	1338%	1080%	964%	905%	837%	829%
80	0%	0%	0%	669954%	2616%	1500%	1158%	1036%	943%	858%	831%
90	0%	0%	0%	0%	3157%	1676%	1240%	1081%	954%	887%	821%
100	0%	0%	0%	0%	4929%	1914%	1353%	1149%	986%	916%	846%

Fuente: Elaboración Autores

Tabla 13 Diferencias Porcentuales de Sobreancho Modelaciones vs. Calculo INVIAS Vehículo Rígido – Curva ECE

DIFERENCIAS PORCENTUALES - SOBREANCHOS MODELACIÓN Vs. CALCULO RÍGIDOS											
Deflexión (°) Velocidad (km/h)	20.0	30.0	40.0	50.0	60.0	70.0	80.0	90.0	100.0	110.0	120.0
40	-	-	-	-	-	-	-	274%	290%	318%	345%
50	-	-	-	-	1384%	1345%	1172%	1408%	1541%	871%	1142%
60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
70	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
90	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Fuente: Elaboración Autores

Tabla 14 Diferencias Porcentuales de Sobreancho Modelaciones vs. Calculo INVIAS Vehículo Articulado – Curva ECE

DIFERENCIAS PORCENTUALES - SOBREANCHOS MODELACIÓN Vs. CALCULO ARTICULADOS											
Deflexión (°) Velocidad (km/h)	20.0	30.0	40.0	50.0	60.0	70.0	80.0	90.0	100.0	110.0	120.0
40	-	-	-	-	-	-	-	1917%	2256%	-	-
50	-	-	-	-	8305%	8320%	7539%	9532%	11251%	7286%	-
60	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
70	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
90	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Fuente: Elaboración Autores

Luego de obtener las diferencias porcentuales para cada tipo de curva y teniendo en cuenta que los cálculos efectuados bajo la normativa INVIAS y las modelaciones computacionales realizadas y cuyos resultados se presentaron anteriormente, para cada uno de los casos, se empleó un ancho de calzada de 7,30 metros debido al tipo de terreno que se presenta en el territorio colombiano montañoso y una categoría de la carretera seleccionada es primaria de dos calzadas tal como se presenta a continuación.

CATEGORÍA DE LA CARRETERA	TIPO DE TERRENO	VELOCIDAD DE DISEÑO DEL TRAMO HOMOGÉNEO (V _{TR}) (km/h)									
		20	30	40	50	60	70	80	90	100	110
Primaria de dos calzadas	Plano	-	-	-	-	-	-	7.30	7.30	7.30	7.30
	Ondulado	-	-	-	-	-	-	7.30	7.30	7.30	7.30
	Montañoso	-	-	-	-	-	7.30	7.30	7.30	7.30	-
	Escarpado	-	-	-	-	-	7.30	7.30	7.30	-	-
Primaria de una calzada	Plano	-	-	-	-	-	-	7.30	7.30	7.30	-
	Ondulado	-	-	-	-	-	7.30	7.30	7.30	7.30	-
	Montañoso	-	-	-	-	7.30	7.30	7.30	7.30	-	-
	Escarpado	-	-	-	-	7.00	7.00	7.00	-	-	-
Secundaria	Plano	-	-	-	-	7.30	7.30	7.30	-	-	-
	Ondulado	-	-	-	7.00	7.30	7.30	7.30	-	-	-
	Montañoso	-	-	6.60	7.00	7.00	7.00	-	-	-	-
	Escarpado	-	-	6.00	6.60	7.00	-	-	-	-	-
Terciaria	Plano	-	-	6.00	-	-	-	-	-	-	-
	Ondulado	-	6.00	6.00	-	-	-	-	-	-	-
	Montañoso	6.00	6.00	6.00	-	-	-	-	-	-	-
	Escarpado	6.00	6.00	-	-	-	-	-	-	-	-

Figura 31. Tabla 5.2 Ancho de Calzada (metros).

Fuente: Manual de Diseño geométrico, 2008

Los diferentes parámetros necesarios para el diseño de una curva horizontal, los cuales se describen en capítulos anteriores y que hacen referencia principalmente a la longitud de las espirales y radios de las curvas, los cuales son calculados y obtenidos de acuerdo a los parámetros establecidos en el manual de INVIAS tanto para las curvas espirales como para la espiral – círculo – espiral.

Por consiguiente, teniendo en cuenta lo anteriormente enunciado y los cuadros presentados con las diferencias porcentuales, se lleva a cabo la escogencia de la curva a modelar pruebas piloto para cada una de las tipologías en estudio tal y como se evidencia a continuación.

- Curvas Espiral – Espiral

Para este caso se puede observar que las diferencias porcentuales son superiores al 100% y alcanzan un máximo de 928%, exceptuando el valor de 118745% para vehículo rígido y en el caso de los vehículos articulados un valor de 669954%, obtenidos para la deflexión de 50° y velocidad de 80km/h, este resultado se da una vez que al medir el valor de sobrealcance para esta curva es muy cercano a cero

(0.0008) por lo cual este valor no se tiene en cuenta para la definición de la curva a plasmar pruebas piloto.

Adicionalmente, como se puede observar, en la Tabla 11 Diferencias Porcentuales de Sobreancho Modelaciones vs. Calculo INVIAS Vehículo Rígido – Curva EE y Tabla 12 Diferencias Porcentuales de Sobreancho Modelaciones vs. Calculo INVIAS Vehículo Articulado – Curva EE, la máxima diferencia porcentual obtenida para este tipo de curvas se presenta para la misma deflexión y velocidad para ambas tipologías de vehículo planteado por el INVIAS, el cual se presenta para una deflexión de 50° y una velocidad de 70 km/h, curva que se presenta a continuación.

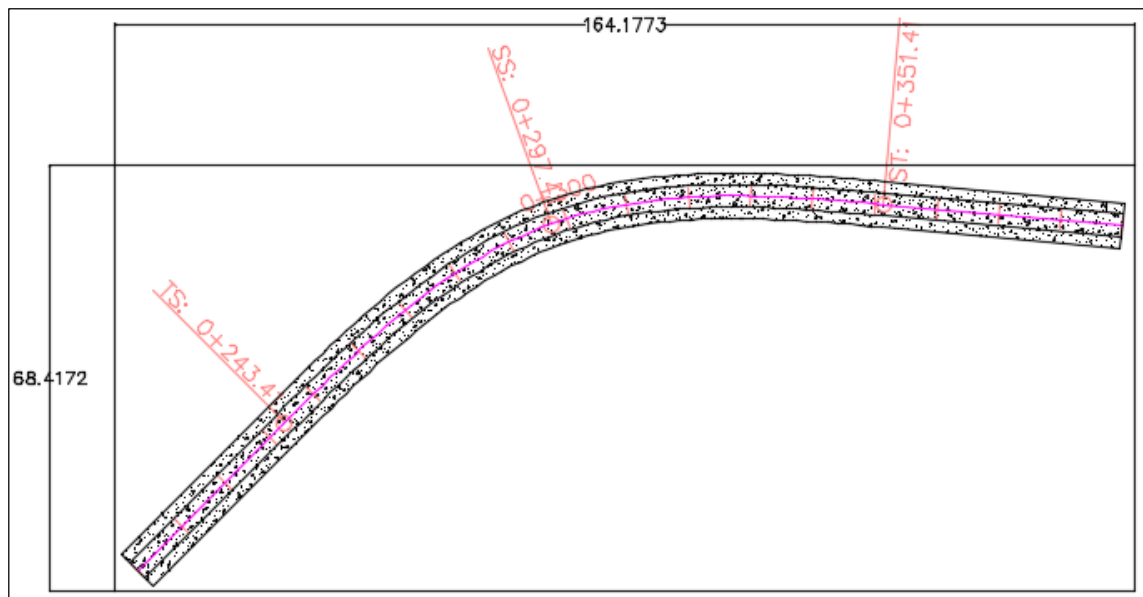


Figura 32. Curva Espiral – Espiral Velocidad 70 Deflexión 50
Fuente: Elaboración autores

- Curvas Espiral – Circulo – Espiral

De acuerdo a lo evidenciado y descrito precedentemente, para este tipo de curvas los valores obtenidos para el sobreancho se encuentran únicamente para velocidades bajas y deflexiones altas. Así mismo, al efectuar la revisión de diferencia porcentuales se pudo observar el mismo comportamiento presentado en las curvas espiral – espiral, en donde la máxima diferencia porcentual encontrada se presenta en la misma deflexión y velocidad independientemente del tipo de vehículo (rígido o articulado) con el cual se esté comparando, es por ello que para ese caso y tal como se puede evidenciar en la Tabla 13 Diferencias Porcentuales de Sobreancho Modelaciones vs. Calculo INVIAS Vehículo Rígido – Curva ECE y Tabla 14 Diferencias Porcentuales de Sobreancho Modelaciones vs. Calculo INVIAS Vehículo Articulado – Curva ECE, la curva seleccionada para implantar pruebas piloto y efectuar el análisis de sobreancho con el vehículo de carga de

estudio es la curva correspondiente a una deflexión de 100° y velocidad de 50 km/h, tal y como se puede observar a continuación.

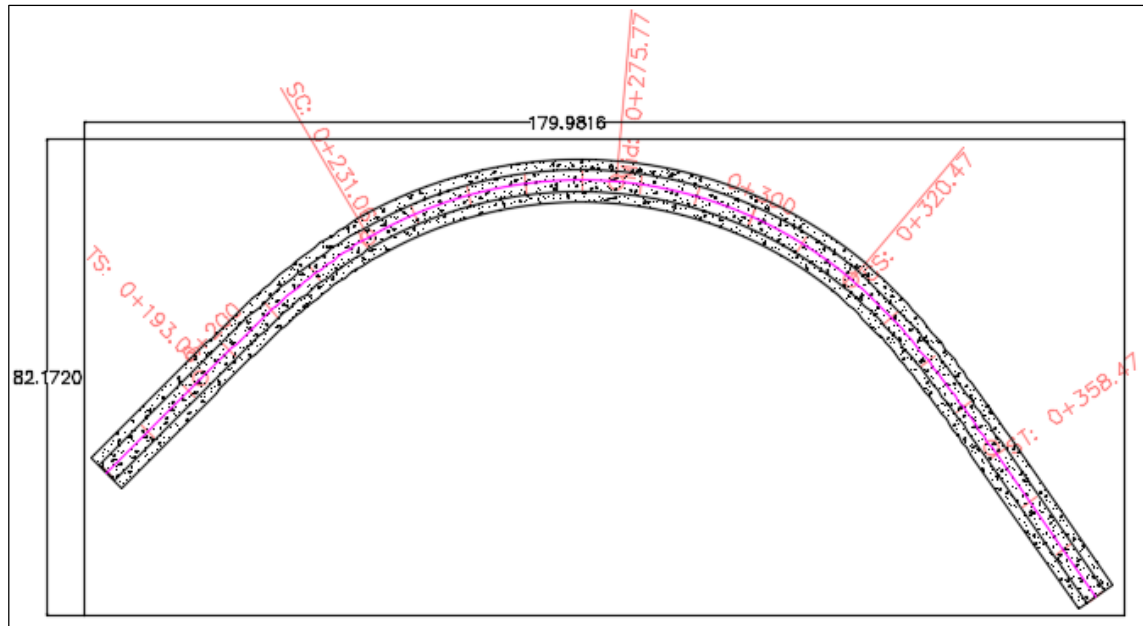


Figura 33. Curva Espiral – Círculo – Espiral Velocidad 50 Deflexión 100
Fuente: Elaboración autores

Posteriormente, con las dos curvas seleccionadas (una EE y una ECE) se procedió a efectuar cada uno de los pasos descritos en el numeral 8.2.3, donde se inicia por la búsqueda de un lugar, parqueadero, en donde fuera posible trazar y marcar por medio de levantamiento topográfico las dos curvas planteadas y mostradas anteriormente, a continuación se presenta una imagen tomada de Google Earth del sitio seleccionado para la ejecución de las pruebas piloto.



Figura 34. Localización del parqueadero donde se efectuaron las pruebas piloto.
Fuente: Elaboración autores

Una vez que se cuenta con la locación, se procede a efectuar la localización de las mismas por medio de coordenadas reales y se efectúa el replanteo de las curvas pruebas piloto efectuando su marcación cada 10.0 m en el eje y en el borde interno de la curva, esto, posterior a que, sobre este borde es donde se presenta el sobreancho. Como se puede evidenciar en el Anexo 3. Levantamiento topográfico curvas y Anexo 4. Registro Fotográfico prueba piloto.



Figura 35. Replanteo curvar seleccionadas pruebas piloto.
Fuente: Elaboración autores

En este punto es importante mencionar, que se marcaron pruebas piloto únicamente los carriles internos en cada una de las curvas, una vez que sobre este es que se plantea el valor de sobreancho y sobre este, ha sido medido en las modelaciones efectuadas de manera computacional desarrollado en el Anexo 5. Modelaciones vehículo C3S2 prueba piloto.

2. Posteriormente y teniendo en cuenta la metodología enunciada en este documento, se procede a efectuar el tránsito de los vehículos seleccionados por las curvas ya replanteadas de manera tal que se pueda evidenciar la huella dejada por la parte trasera del vehículo, según lo presentado en el Anexo 4. Registro Fotográfico Prueba piloto.



Figura 36. Huella marcada por el paso del vehículo seleccionado.
Fuente: Elaboración autores

Así mismo, y con el fin de mejorar la investigación se realizaron pruebas piloto, con diferentes vehículos de manera de tener mayor información base a la hora de efectuar la comparación entre las diferentes metodologías de obtención del sobreancho.

3. Una vez que los vehículos han dejado la marca de la huella del tractocamión se procede a realizar una verificación de la distancia del borde de carril hasta el borde externo de la huella marcada para cada una de las curvas, dichos resultados se presentan a continuación.

- Curva Espiral – Espiral

Para estas curvas se midió la distancia para los diferentes vehículos analizados en el numeral 9, obteniendo que el valor de sobreancho es función directa de las dimensiones del vehículo es por ello que para los camiones C3S2, se requiere mayor distancia adicional después del borde de carril, tal y como se puede observar a continuación.

Tabla 15 Valor de Sobreancho Modelaciones de las pruebas piloto Curva EE – Vehículo C3S2

VEHÍCULO	SOBREANCHO MEDIDO (m)			SOBREANCHO MÁXIMO (m)
C3S3 Tipo camabaja	0.28	0.25	0.17	0.28
C3S3 Carrotanque de Gasolina	0.00	0.00	0.00	0.00
C3S2 Tipo camabaja - sin carga	0.34	0.30	0.40	0.40
C3S2 Tipo camabaja - con carga	0.45	0.50	0.35	0.50

Fuente: Elaboración autores

- Curva Espiral – Circulo – Espiral

Luego de llevar a cabo el recorrido en la prueba piloto de los diferentes vehículos descritos en el numeral 9, se logró evidenciar que la huella del tractocamión dejada tras efectuar el tránsito por este tipo de curva no sobrepasó en ningún punto de la curva efectuada el borde de carril ni el borde demarcado como eje.

Por lo anterior, se puede inferir que para las curvas espiral-circulo-espiral, los vehículos de carga pesada que transitan actualmente por el territorio colombiano no requieren de una distancia adicional al ancho del carril (sobreancho) para poder circular de manera adecuada y sin generar algún tipo de invasión al carril aledaño.

11. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el capítulo anterior se obtuvieron los valores de sobreancho para las diferentes metodologías evaluadas, de manera tal, que para los resultados obtenidos bajo el cálculo de las expresiones planteadas por el INVIAS y las obtenidas bajo las modelaciones efectuadas bajo la modelación en el software Vehicle Tracking, es posible efectuar un comparativo a lo largo de todas las deflexiones (de 20° a 120°) y velocidades (de 40km/h a 100km/h) evaluadas a lo largo de esta investigación, sin embargo, tal y como se ha descrito para el caso de la modelaciones pruebas piloto solo se efectuó el análisis para aquellas curvas en donde se evidencio las mayores diferencias porcentuales.

En ese sentido, para efectuar el análisis de los resultados de manera adecuada en este capítulo se presentará una serie de gráficos (nomogramas) y cuadros comparativos de la siguiente manera:

- Nomogramas de sobreancho en función de la deflexión (manual de diseño geométrico del INVIAS 2008 vs. modelaciones Vehicle tracking).
- Nomogramas de sobreancho en función de la velocidad (manual de diseño geométrico del INVIAS 2008 vs. modelaciones Vehicle tracking).
- Análisis estadístico de los resultados (manual de diseño geométrico del INVIAS 2008 vs. modelaciones Vehicle tracking).
- Comparación de metodologías y formulaciones (manual de diseño geométrico del INVIAS 2008 vs. modelaciones Vehicle tracking vs modelaciones de las prueba piloto).
- Propuesta cálculo de sobreancho.
- Impacto Social y Ambiental.

Partiendo de lo anterior, a continuación se describen y analizan cada uno de los puntos relacionados previamente para cada uno de los dos tipos de curvas analizadas en este documento (EE y ECE)

11.1. Curvas Espiral - Espiral

11.1.1. Nomogramas de Sobreancho en Función de la Deflexión

En este numeral se presentan los nomogramas efectuados con base en los valores de sobreancho obtenidos bajo la metodología planteada por el manual de diseño geométrico del INVIAS de 2008 y las modelaciones efectuadas por Vehicle

Tracking, en los cuales se presenta como variable independiente la deflexión y como variable dependiente el sobreancho para las diferentes velocidades evaluadas.

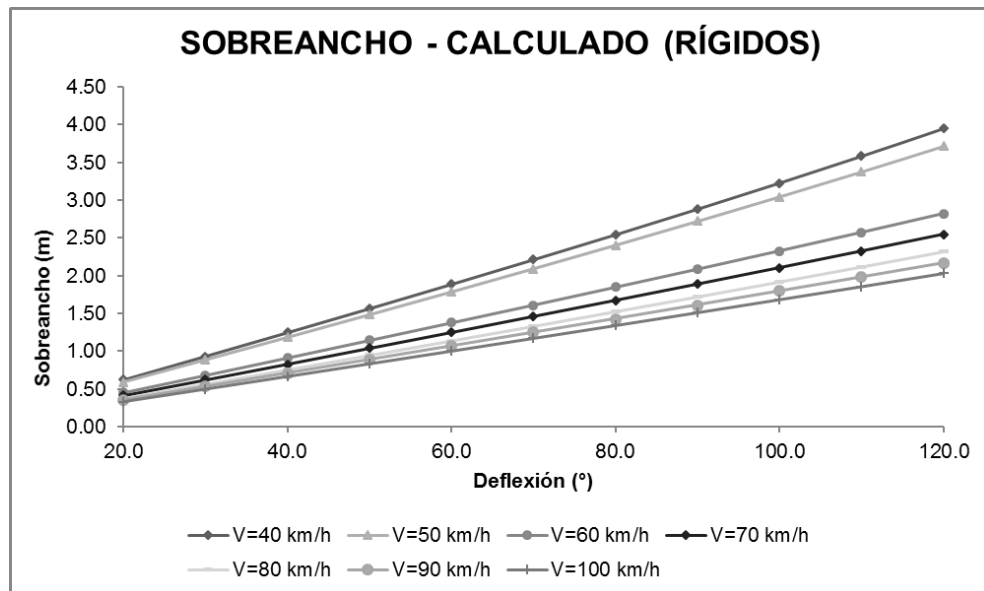


Figura 37. Cálculo para vehículos rígidos del Manual de Diseño de 2008 -Curva EE
Fuente: Elaboración Autores

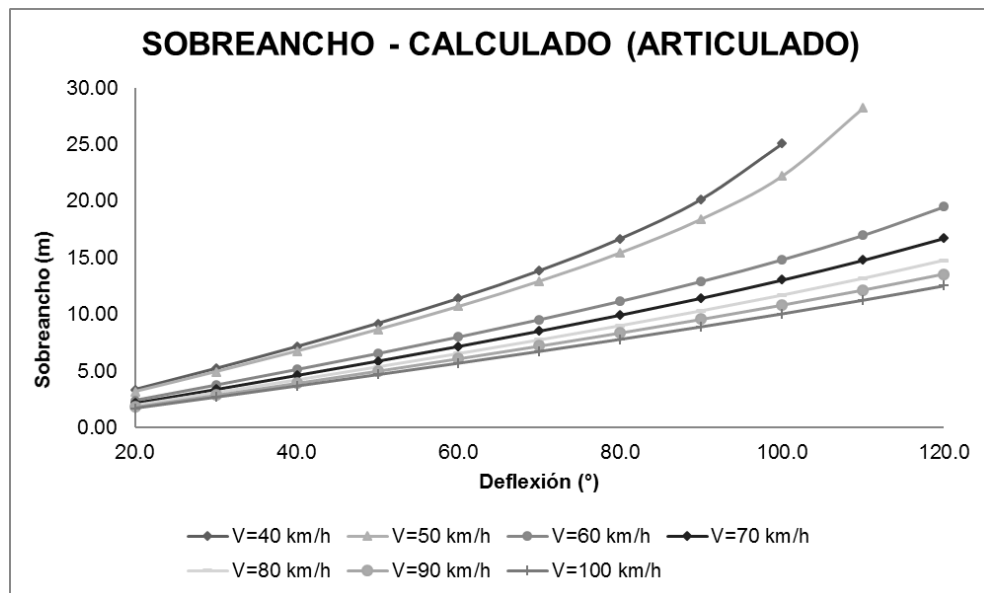


Figura 38. Cálculo para vehículos articulados del Manual de Diseño de 2008 – Curva EE
Fuente: Elaboración Autores

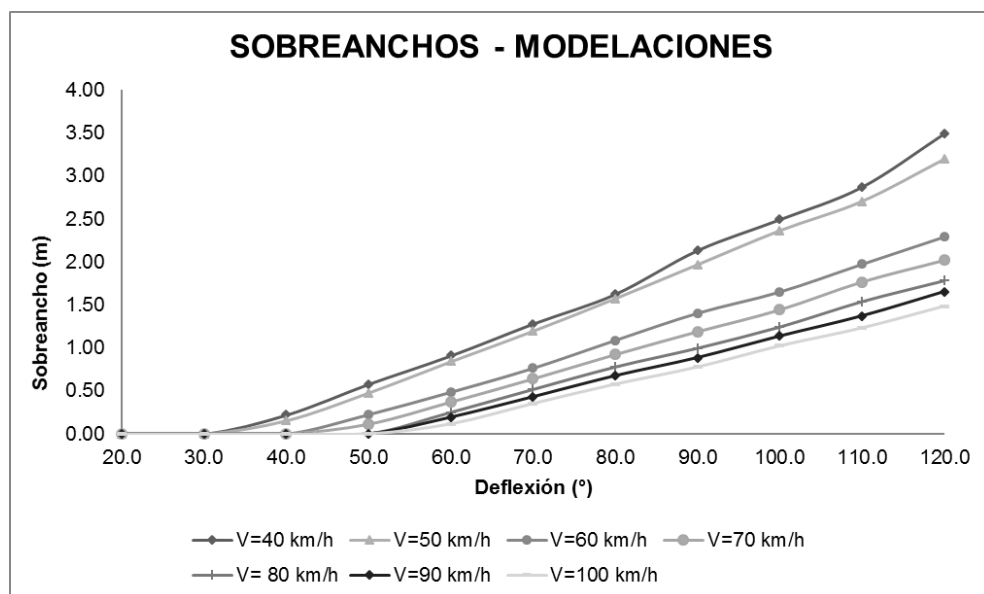


Figura 39. Modelaciones realizadas a través del Software Vehicle Tracking – Curva EE
Fuente: Elaboración Autores

Así como se puede observar, en las figuras presentadas y en los datos presentados en las tablas del capítulo anterior, el aumento del sobreancho para todas las velocidades es proporcional al aumento de la deflexión. No obstante, tal y como se puede observar en el gráfico de modelaciones, se evidencia que a medida que la velocidad aumenta el valor de sobreancho se vuelve nulo (0.0 m) para las menores deflexiones, este comportamiento se da, debido a que en las curvas espirales el radio de curvatura es mayor, lo que genera una facilidad de maniobrabilidad de los vehículos de carga y a su vez genera eficacia al generar el giro.

Así pues, se evidencia que sin importar el método de cálculo tenido en cuenta para la obtención del sobreancho, el valor de este es mayor a velocidades menores. Es por ello que se efectúan gráficos comparativos de sobreancho efectuados para las velocidades analizadas en este documento y de los cálculos enunciados anteriormente.

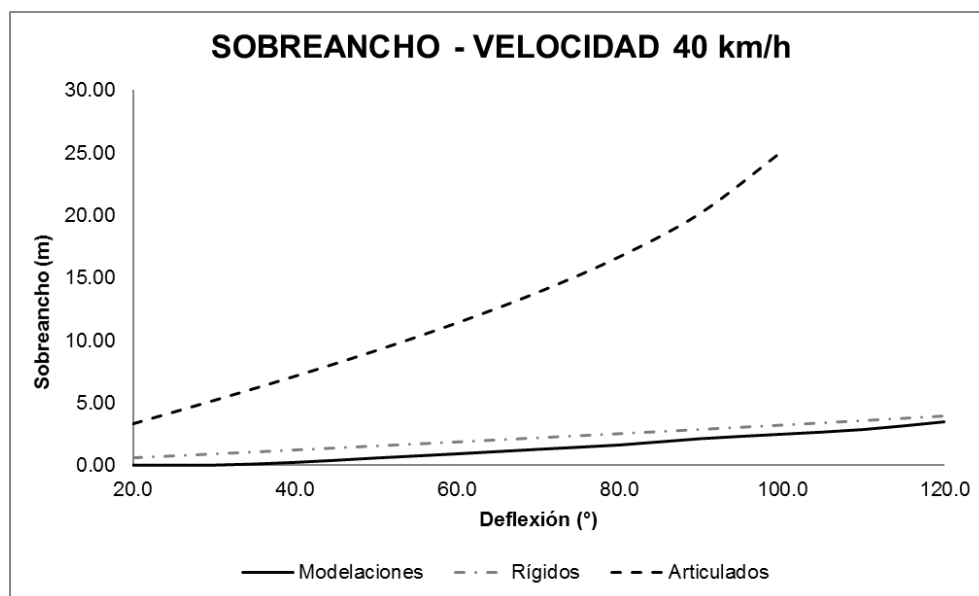


Figura 40. Nomograma comparación de métodos velocidad de 40km/h – Curva EE
Fuente: Elaboración Autores

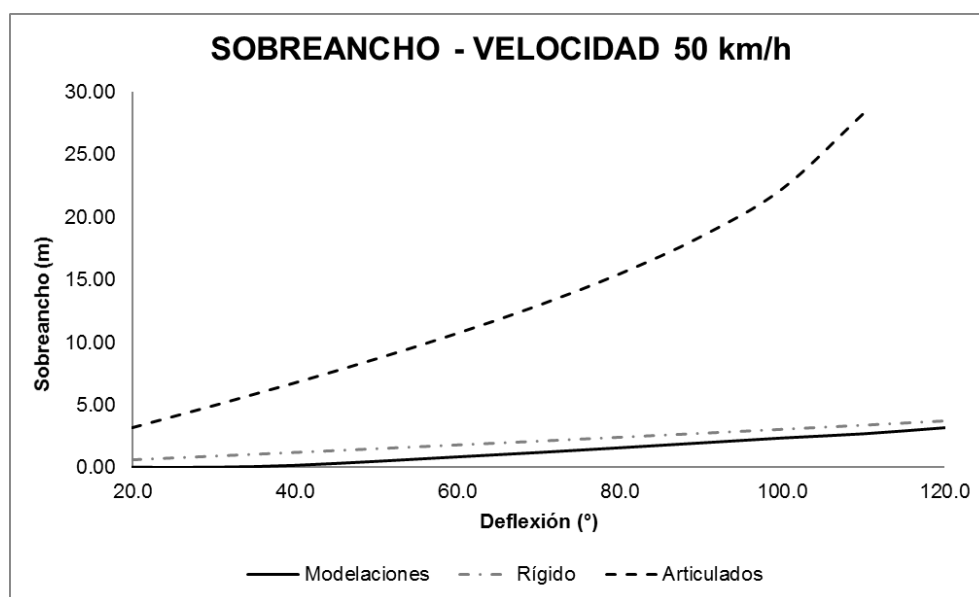


Figura 41. Nomograma comparación de métodos velocidad de 50km/h – Curva EE
Fuente: Elaboración Autores

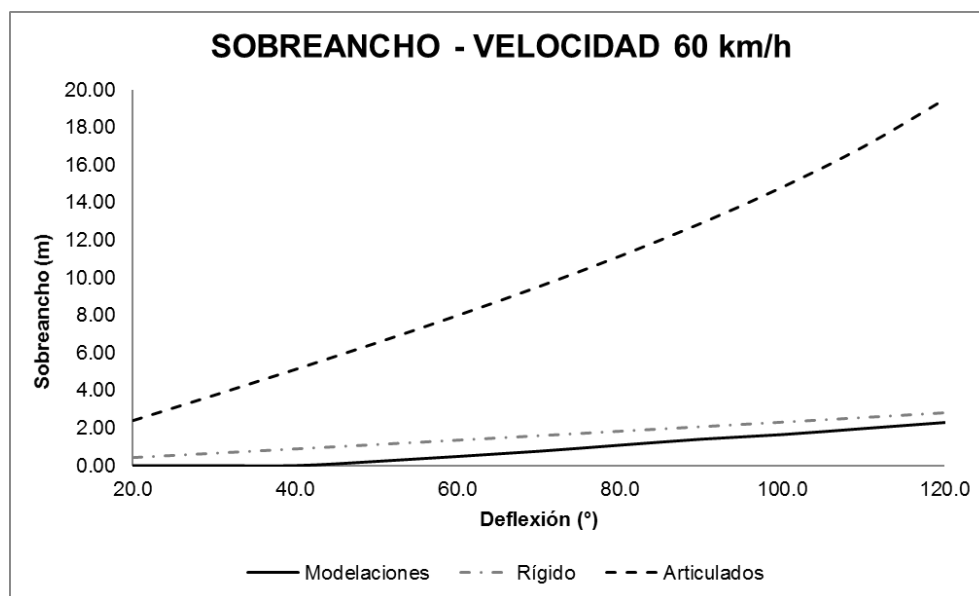


Figura 42. Nomograma comparación de métodos velocidad de 60km/h – Curva EE
Fuente: Elaboración Autores

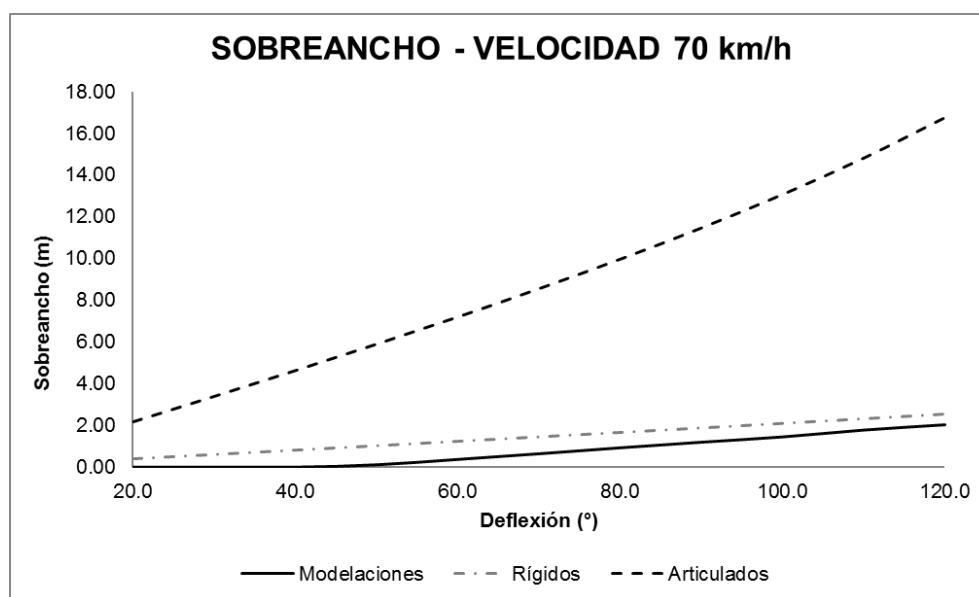


Figura 43. Nomograma comparación de métodos velocidad de 70km/h – Curva EE
Fuente: Elaboración Autores

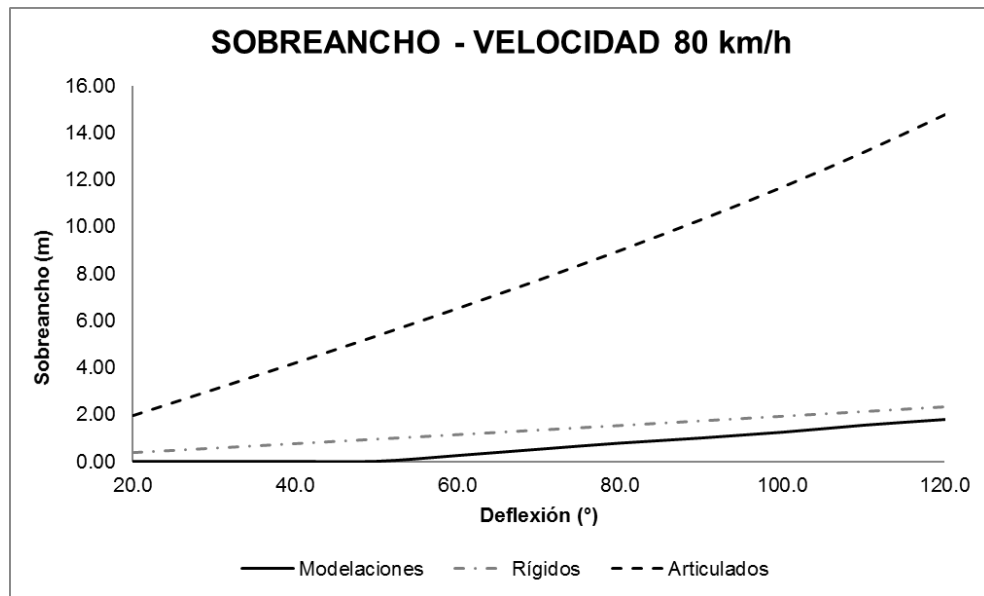


Figura 44. Nomograma comparación de métodos velocidad de 80km/h – Curva EE
Fuente: Elaboración Autores

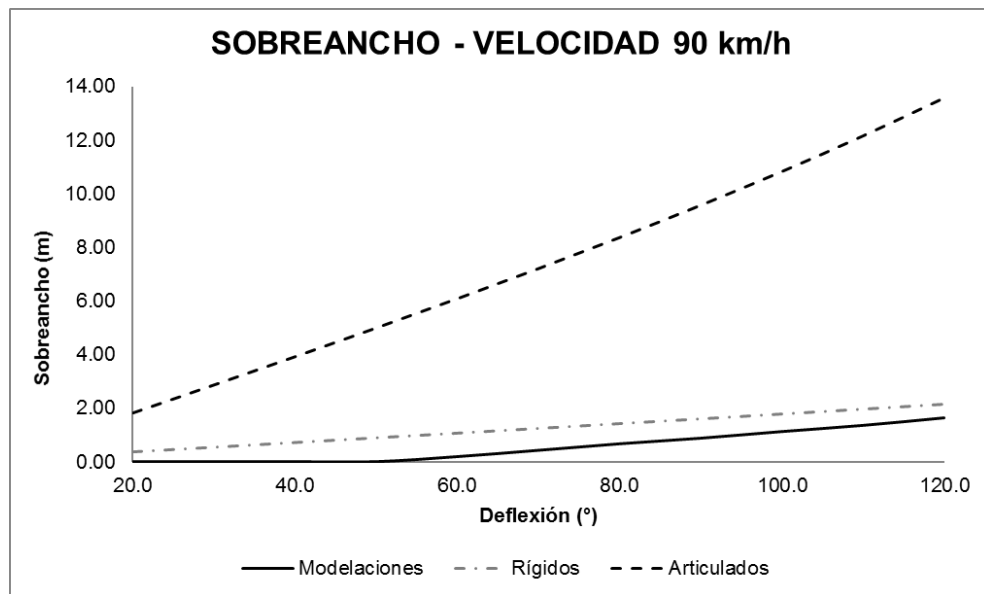


Figura 45. Nomograma comparación de métodos velocidad de 90km/h – Curva EE
Fuente: Elaboración Autores

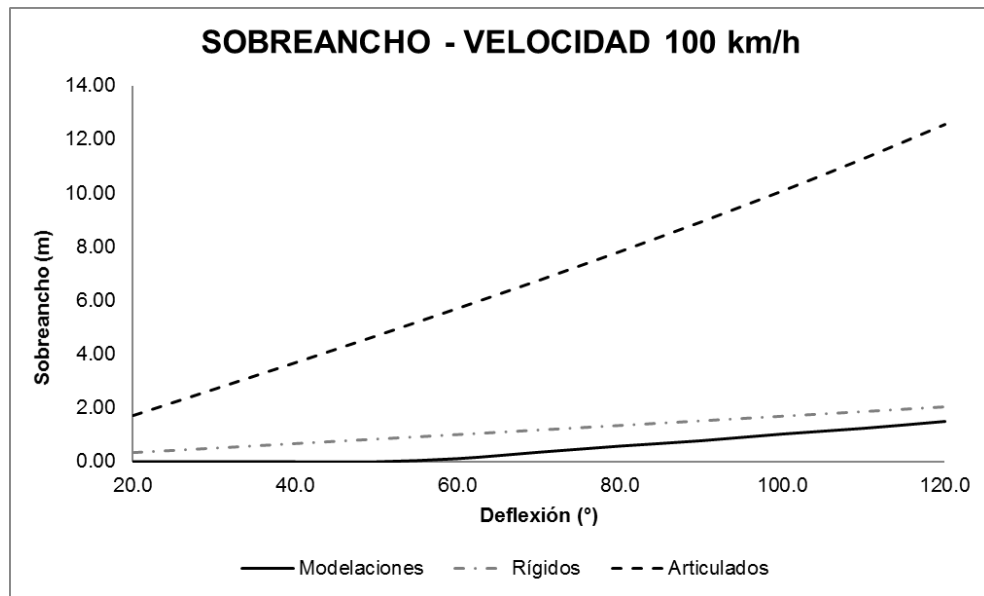


Figura 46. Nomograma comparación de métodos velocidad de 100km/h – Curva EE
Fuente: Elaboración Autores

En los nomogramas, se evidencia de manera más clara la diferencia en el valor de sobreancho encontrada por la diferentes formulaciones presentadas por el INVIAS (rígido y articulado) y las modelaciones efectuadas, logrando observar que los valores de sobreancho más bajo se obtienen bajo la metodología de modelaciones computacionales y los máximos valores se hayan bajo las formulaciones de vehículo articulado del manual de diseño del INVIAS, por último los resultados que se aproximan más a los valores obtenidos en las modelaciones con dimensiones reales son los hallados en los cálculos del INVIAS para vehículos rígidos.

11.1.2. Nomogramas de Sobreancho en Función de la Velocidad

Adicional a los nomogramas evaluados arriba, se presentan las gráficas en donde se relaciona la variabilidad del sobreancho en función a la velocidad evaluada a lo largo de este documento, bajo la metodología enmarcada por el INVIAS y las modelaciones efectuadas de manera computacional.

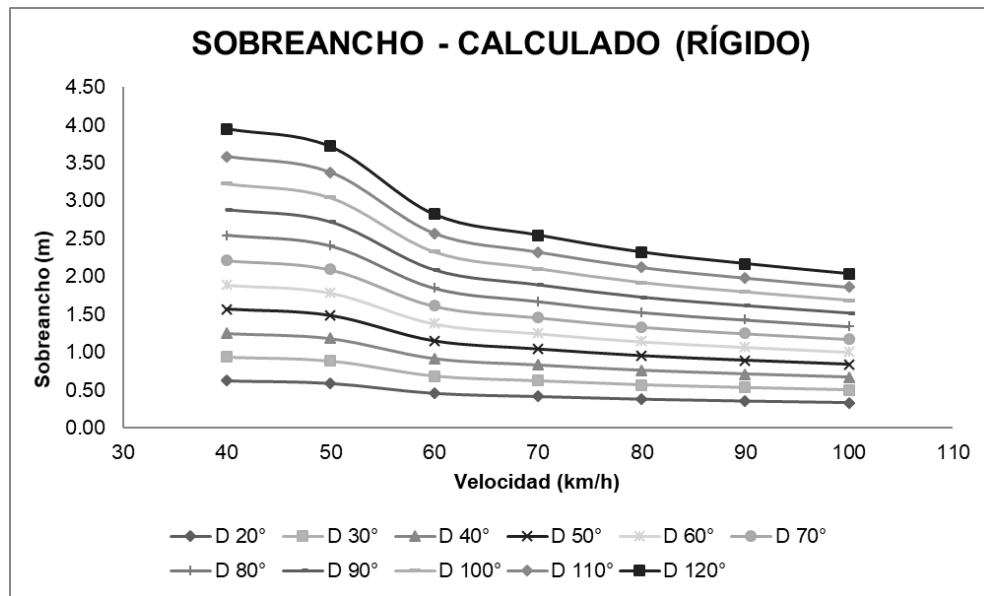


Figura 47. Cálculo para vehículos rígidos del Manual de Diseño de 2008 – Curva EE
Fuente: Elaboración Autores

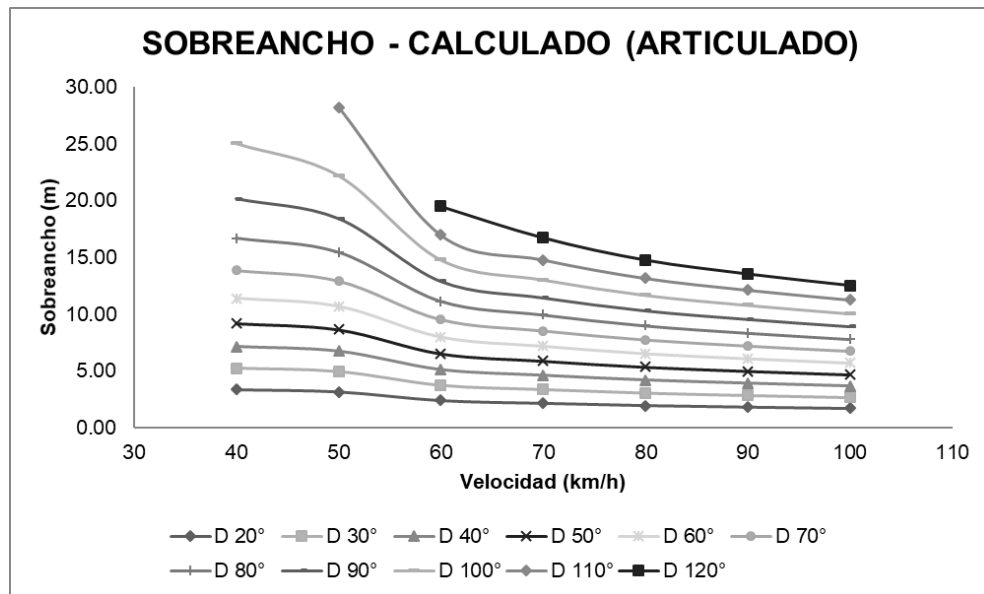


Figura 48. Cálculo para vehículos articulados del Manual de Diseño de 2008 – Curva EE
Fuente: Elaboración Autores

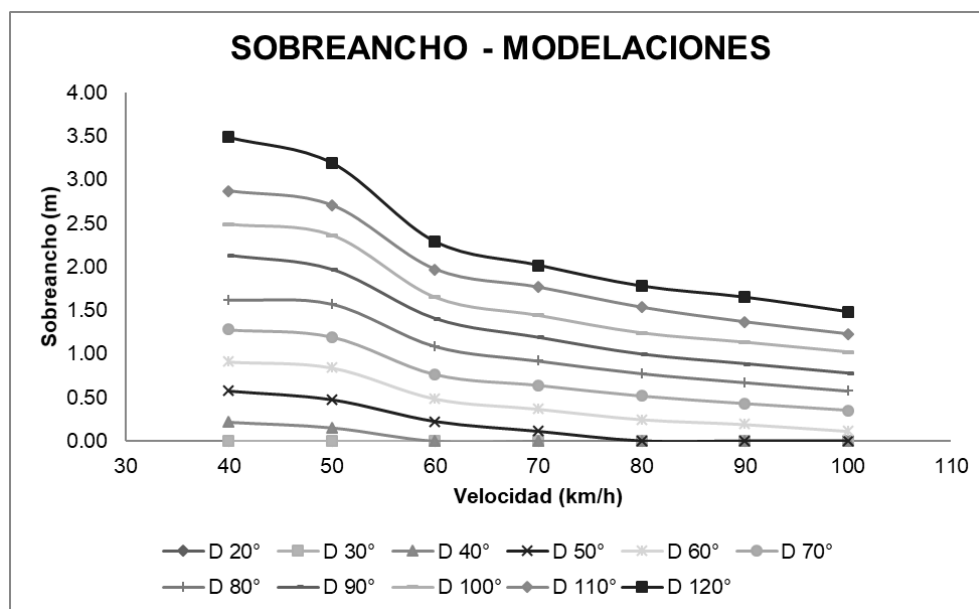


Figura 49. Modelaciones realizadas a través del Software Vehicle Tracking – Curva EE
Fuente: Elaboración Autores

Tal y como se ha enunciado las gráficas precedentemente presentadas, donde se muestra la variabilidad del sobreancho en función a la velocidad para las diferentes deflexiones evaluadas, de manera que se puede evidenciar que para las tres metodologías de cálculo analizadas (INVIAS rígido y articulado – modelaciones) se presenta la misma tendencia en el comportamiento, en donde a mayor velocidad independientemente de la deflexión el valor de sobreancho decrece, y la misma velocidad el valor de sobreancho incrementa a medida que incrementa la deflexión. Adicionalmente, y como se ha enunciado en el numeral 10. CÁLCULOS Y MODELACIONES DE SOBREANCHOS, para el caso de las modelaciones se logra evidenciar que los resultados de sobreancho se reportan a partir de las deflexiones de 40° y para velocidades bajas, empezando a mostrar de manera continua valores de sobreancho (diferentes de 0.00) para todas las velocidades a partir de un ángulo de deflexión de 60°.

A continuación, se presentan los nomogramas en los cuales se puede evidenciar claramente las diferentes metodologías y sus diferencias en valores de sobreancho para la misma deflexión.

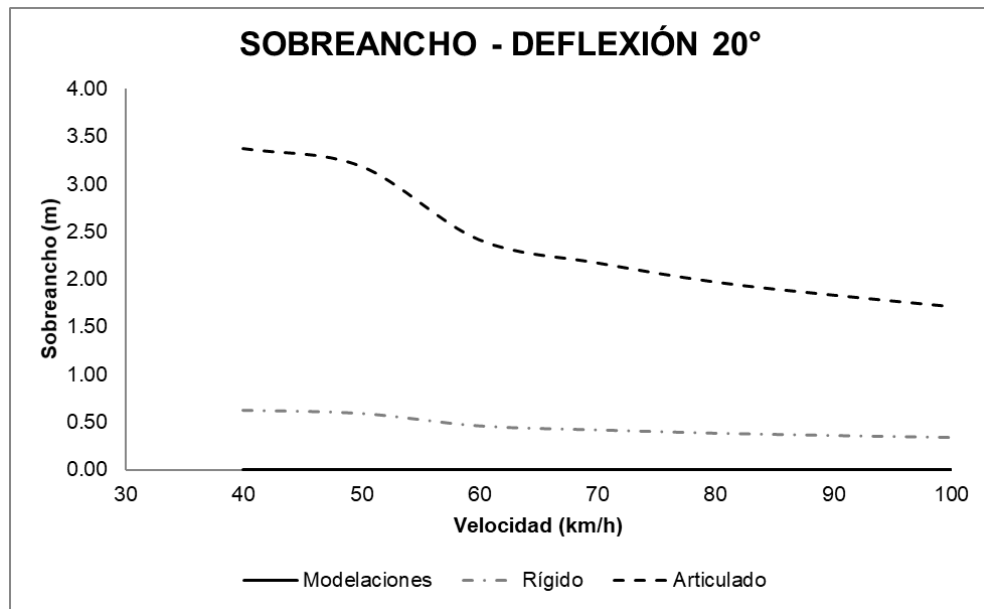


Figura 50. Nomograma comparación de métodos deflexión de 20° - Curva EE
Fuente: Elaboración Autores

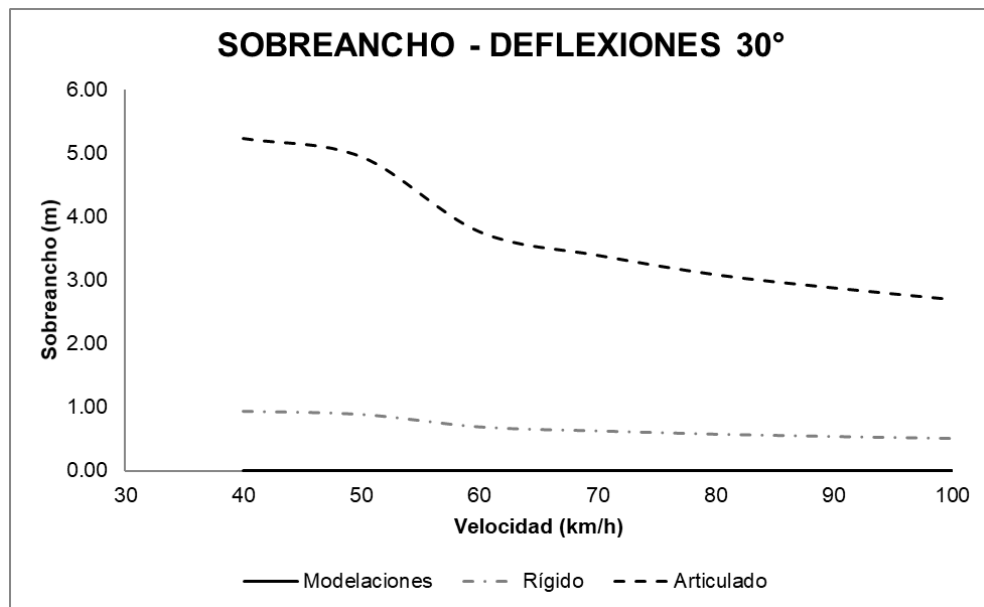


Figura 51. Nomograma comparación de métodos deflexión de 30° - Curva EE
Fuente: Elaboración Autores

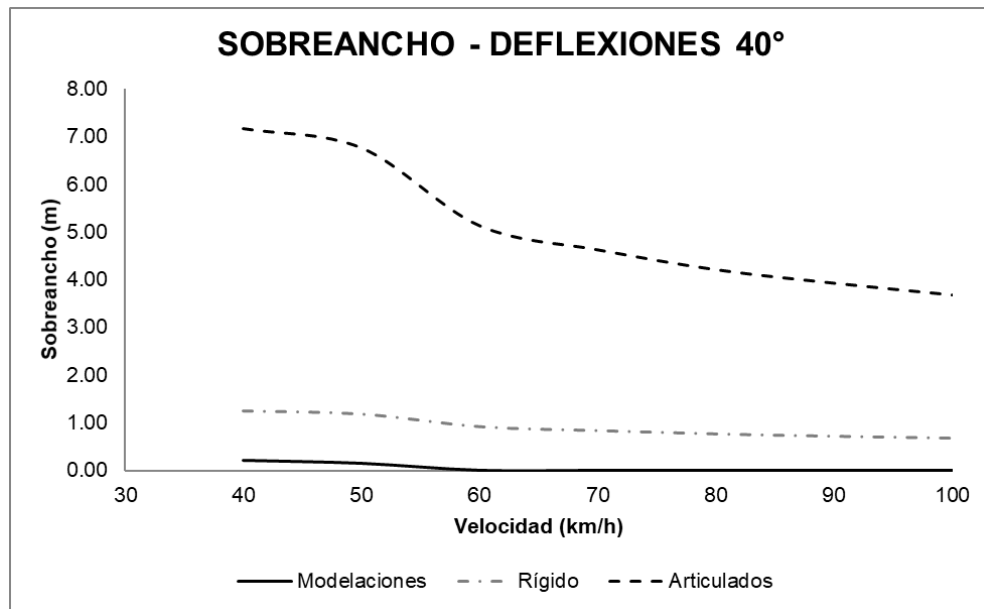


Figura 52. Nomograma comparación de métodos deflexión de 40° - Curva EE
Fuente: Elaboración Autores

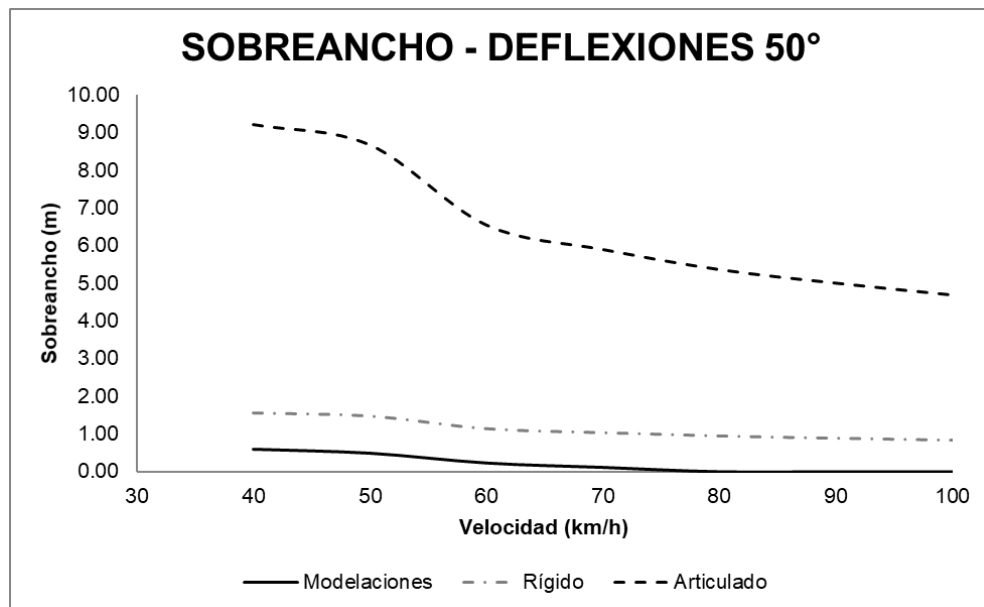


Figura 53. Nomograma comparación de métodos deflexión de 50° - Curva EE
Fuente: Elaboración Autores

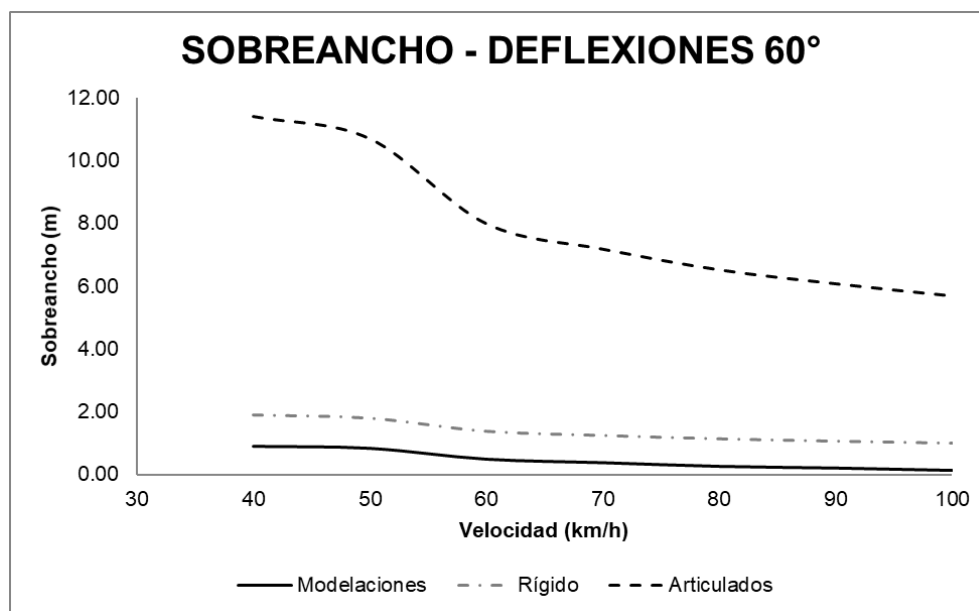


Figura 54. Nomograma comparación de métodos deflexión de 60° - Curva EE
Fuente: Elaboración Autores

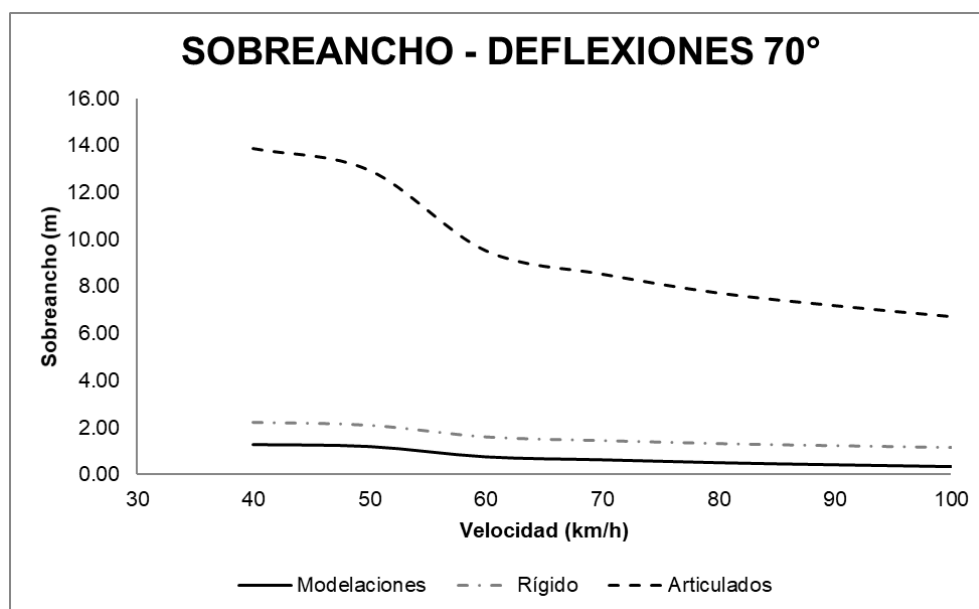


Figura 55. Nomograma comparación de métodos deflexión de 70° - Curva EE
Fuente: Elaboración Autores

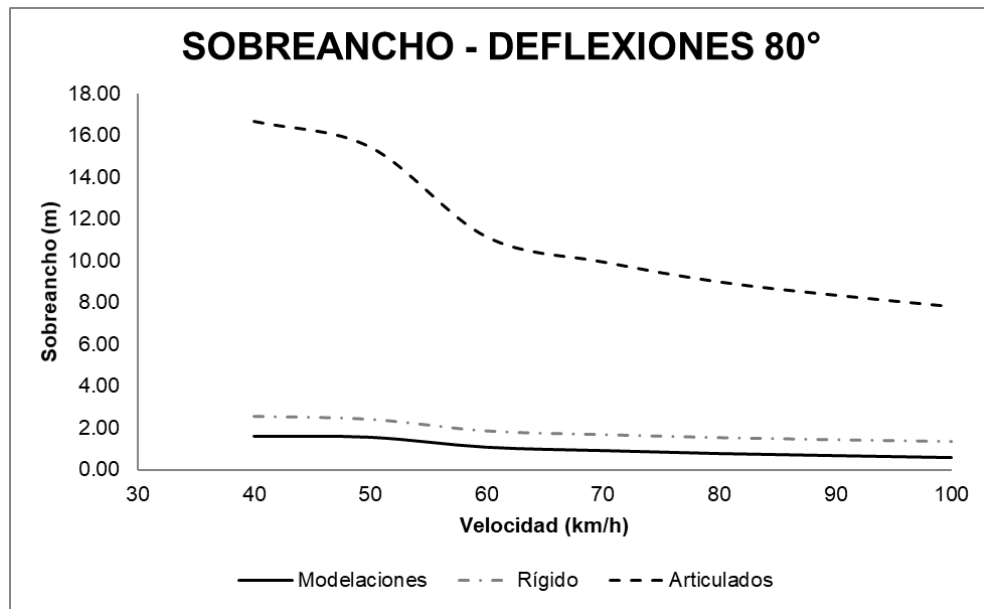


Figura 56. Nomograma comparación de métodos deflexión de 80° - Curva EE
Fuente: Elaboración Autores

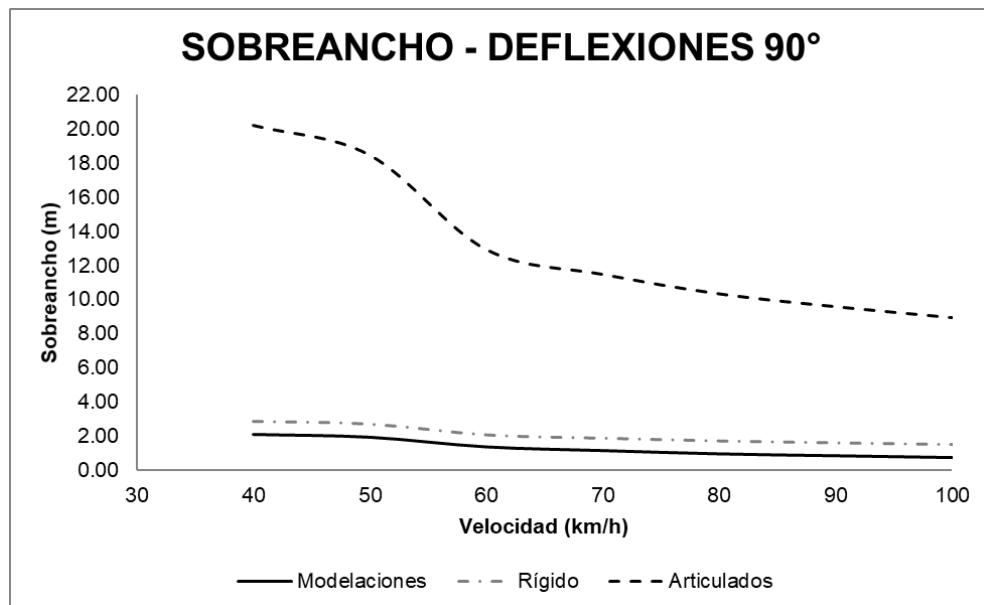


Figura 57. Nomograma comparación de métodos deflexión de 90° - Curva EE
Fuente: Elaboración Autores

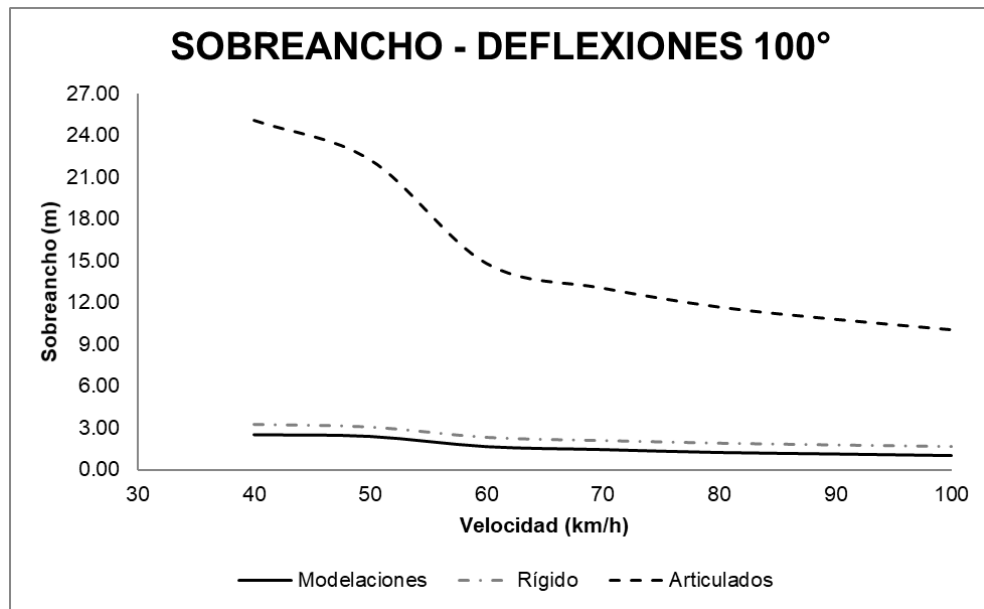


Figura 58. Nomograma comparación de métodos deflexión de 100° - Curva EE
Fuente: Elaboración Autores

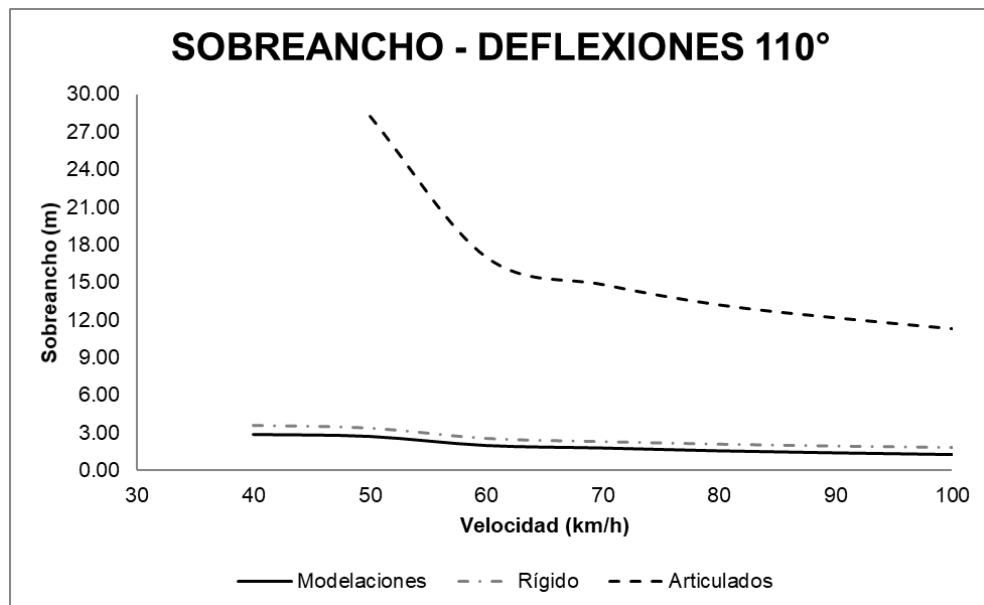


Figura 59. Nomograma comparación de métodos deflexión de 110° - Curva EE
Fuente: Elaboración Autores

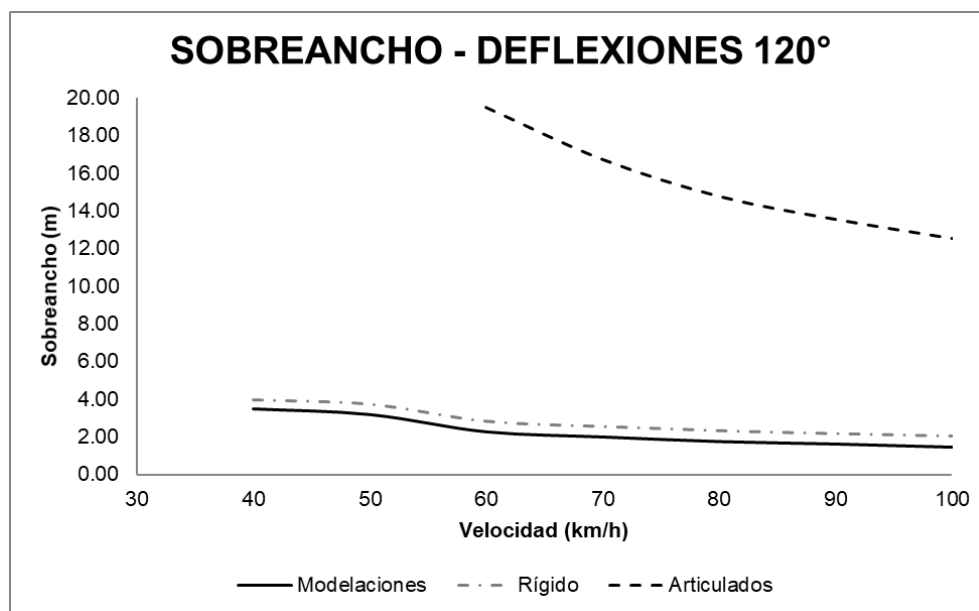


Figura 60. Nomograma comparación de métodos deflexión de 120° - Curva EE
Fuente: Elaboración Autores

En las figuras anteriores, se evidencia de manera clara que de las metodologías de cálculo evaluadas para la obtención de sobreancho, para todas las deflexiones y velocidades con la que se obtiene un mayor valor de sobreancho es con las formulaciones planteadas para los vehículos articulados de la metodología INVIAS versus al menor valor encontrado el cual se registra a través de las modelaciones computacionales efectuadas, adicionalmente se puede apreciar que los resultados más próximos a los reportados por las modelaciones a través del software vehicle tracking son los obtenidos bajo las formulaciones planteadas por el INVIAS para vehículos rígidos, adicionalmente en la secuencia de figuras se puede apreciar que cada vez que aumenta la deflexión los valores de sobreancho obtenidos por modelaciones e INVIAS rígidos son más próximos teniendo una diferencia menor entre los mismos.

11.1.3. Análisis Estadístico de los Resultados

Una vez efectuados los cálculos y procedimientos necesarios para la obtención de valores de sobreancho, según lo presentado en el numeral 10 se lleva a cabo un análisis estadístico de los datos obtenidos y recolectados, de manera que se describen las principales variables estadísticas en la siguiente tabla.

Tabla 16 Resultados Análisis Estadístico – Curva EE

VARIABLES ESTADISTICAS		SOBREANCHOS		
		RIGIDOS	MODELACIONES	ARTICULADOS
Cantidad de datos	n	77.00	77.00	74.00
Media aritmética	Media	1.60	0.88	9.43
Desviación típica poblacional	s	0.86	0.88	5.63
Desviación típica muestral	S	0.86	0.89	5.67
Suma de los "n" datos	Sx	123.42	67.42	697.55
Suma de los cuadrados	Sx ²	254.36	118.71	8923.26
Valor mínimo de los datos	Min	0.33	0.00	1.71
Cuartil 1	Q1	0.91	0.00	5.03
Mediana o Cuartil 2	Mediana	1.51	0.67	8.61
Cuartil 3	Q3	2.10	1.44	12.82
Valor máximo de los datos	Máx.	3.95	3.49	28.25

Fuente: Elaboración Autores

Como se puede observar se calculan los valores medios, máximos y mínimos obtenidos para cada una de las metodologías en curvas espiral – espiral, ratificando que los valores más próximos a los obtenidos por modelaciones son los planteados por la formulación de vehículo rígido del manual de diseño geométrico de 2008 y los mayores valores de sobreancho se reportan para las formulaciones de vehículo articulado del INVIAS.

Con el objetivo de evaluar la dispersión que tienen los datos en cada una de las metodologías efectuadas se analizan, la desviación poblacional y muestral, en donde para el caso de rígidos y modelaciones los productos resultantes son bajos, lo cual implica que la dispersión de los valores de sobreancho no es representativa como en el caso de la evidenciada para las formulaciones aplicada en vehículos articulados.

11.1.4. Comparación de Metodología de prueba piloto vs Formulaciones y Modelos Computacionales

Teniendo en cuenta lo descrito en el capítulo 10, en este numeral se presentan los valores y comparaciones efectuadas para la curva de análisis en las modelaciones de la prueba piloto, por ello a continuación se presentan los datos reportados.

Tabla 17 Comparativo Metodologías evaluadas

CURVA	METODOLOGÍA INVIAS		MODELACIÓN VEHICLE TRACKING (m)	MODELACIÓN PRUEBA PILOTO (m)
	RÍGIDO (m)	ARTICULADO (m)		
D = 50° V = 70 km/h C3S2	1.04	5.89	0.11	0.40

Fuente: Elaboración Autores

De acuerdo a la tabla 17, los valores obtenidos son muy dispersos entre sí, no obstante, se deben tener en cuenta las siguientes premisas para su análisis:

- Los valores de sobreancho obtenidos bajo la metodología INVIAS, fueron calculados con las dimensiones presentadas por el manual de diseño geométrico de 2008 (ver capítulo 9).
- Las modelaciones efectuadas por vehicle tracking fueron efectuadas teniendo en cuenta las dimensiones del vehículo del INVIAS y con las dimensiones de carril escogidas para esta investigación.
- Las modelaciones efectuadas pruebas piloto se efectuaron con un vehículo comercial, con dimensiones y proporciones diferentes a las planteadas por el INVIAS en el 2008.

Tomando como punto de partida lo anterior, se evidencia que el valor de sobreancho obtenido en la modelación, se encuentra entre lo reportado por las modelaciones computacionales y lo obtenido bajo los cálculos para vehículos rígidos de acuerdo al manual de diseño geométrico de 2008.

Razón por la cual, se efectuaron unas nuevas modelaciones computacionales, las cuales contemplan las dimensiones de los vehículos comerciales y enunciadas en el numeral 9, en donde para un vehículo C3S2 sin carga se reporta un sobreancho de 0.084 m y para un vehículo C3S2 con carga se requiere un espacio adicional de 2.095 m a partir del borde de carril.

Lo anterior, nos lleva a inferir que el sobreancho real que requiere un vehículo de gran envergadura no solo depende de las dimensiones del carril y del camión sino de la pericia del conductor y la precaución que se tenga al manejar.

11.1.5. Propuesta Calculo de Sobreancho

Efectuada la comparación de los resultados obtenidos de sobreancho para cada una de las metodologías estudiadas y analizadas en esta investigación, se evidencia que los valores alcanzados a partir de las formulaciones planteadas por el manual de 2008, son superiores a los obtenidos tanto en las modelaciones computacionales como en la verificación efectuada en la prueba piloto. Una vez que los resultados más próximos a lo reportado por las modelaciones, están dadas por lo obtenido a partir de las modelaciones efectuadas en el software Vehicle Tracking, teniendo en cuenta que en las modelaciones computacionales no se reporta un valor más próximo debido a que el vehículo empleado en la verificación de la prueba piloto no contempla las mismas dimensiones que el vehículo de diseño empleado en el manual del INVIAS de 2008, y con el cual se efectuaron las modelaciones computacionales.

Con base en lo anterior, y con el fin de generar una propuesta de cálculo para la obtención del sobreancho, se presenta una serie de nomogramas en donde se relaciona los valores de deflexión con el sobreancho para las diferentes velocidades analizadas en este estudio con base en los resultados obtenidos a partir de las modelaciones computacionales. Igualmente y con el objetivo de generar una formulación específica para cada caso se presenta la línea de tendencia con su respectiva formulación y coeficiente de determinación (R^2) el cual para el caso de las curvas espiral-espiral fue superior a 90% lo cual implica una buena calidad del modelo y la eficacia y certeza de emplear la formulación para la obtención de los valores de sobreancho en diferentes deflexiones.

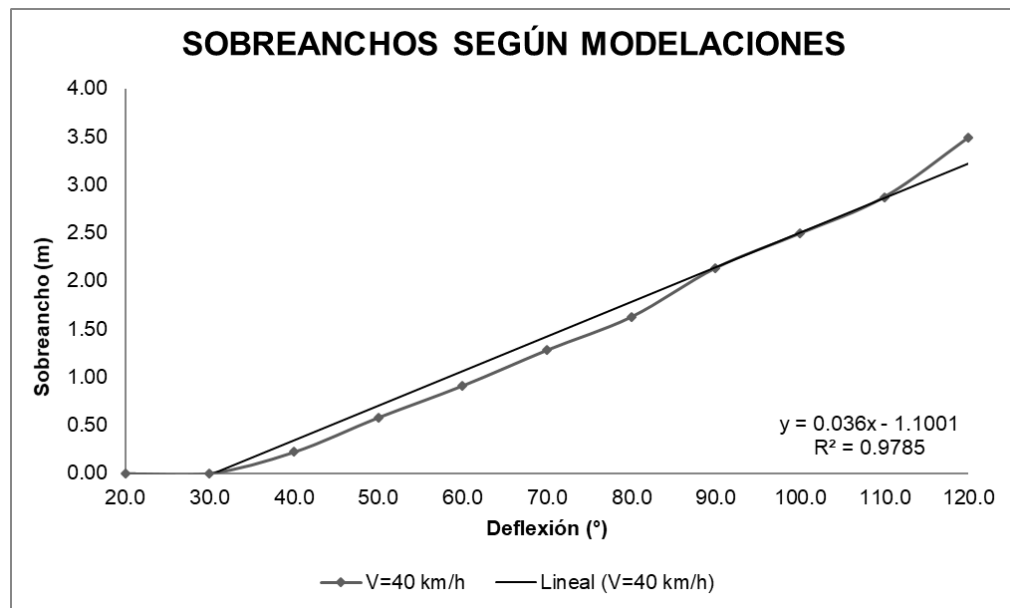


Figura 61. Nomograma sobreancho según modelaciones – Curva EE y V=40km/h
Fuente: Elaboración Autores

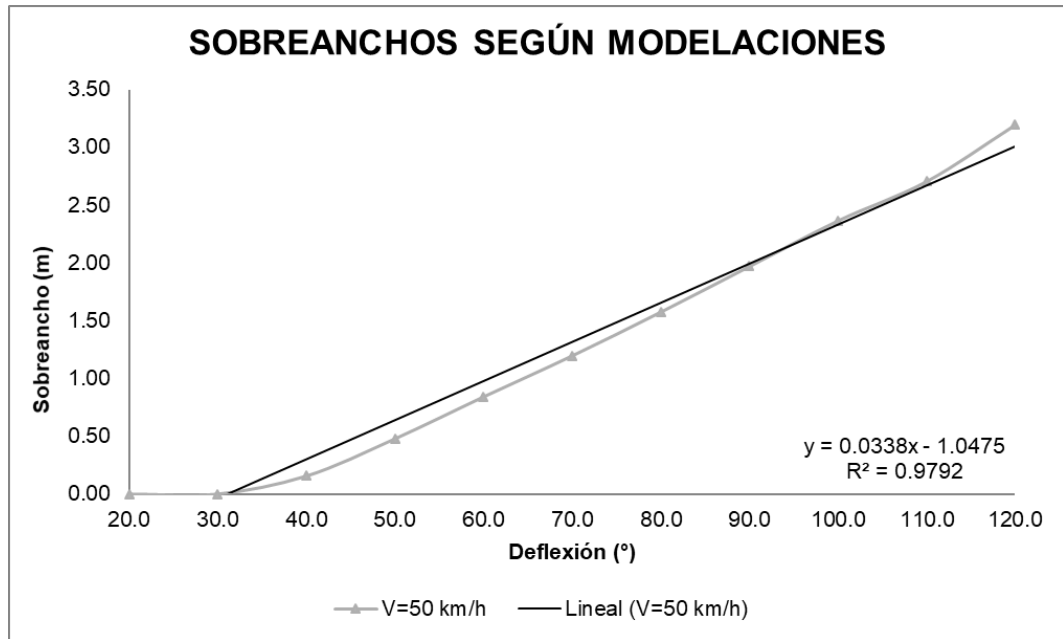


Figura 62. Nomograma sobrehacho según modelaciones – Curva EE y V=50km/h
Fuente: Elaboración Autores

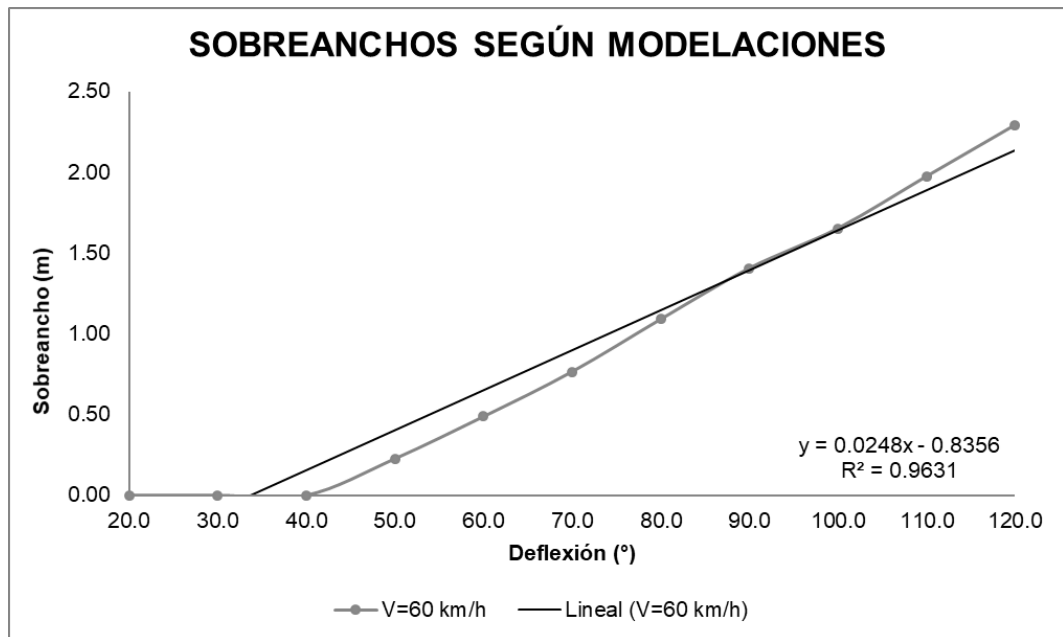


Figura 63. Nomograma sobrehacho según modelaciones – Curva EE y V=60km/h
Fuente: Elaboración Autores

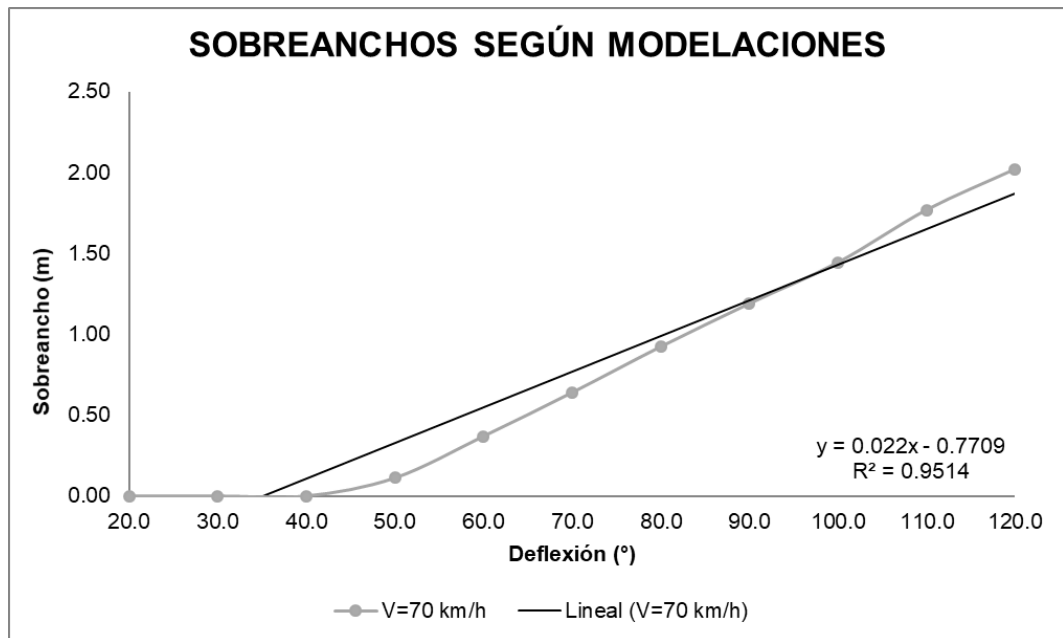


Figura 64. Nomograma sobreancho según modelaciones – Curva EE y V=70km/h
Fuente: Elaboración Autores

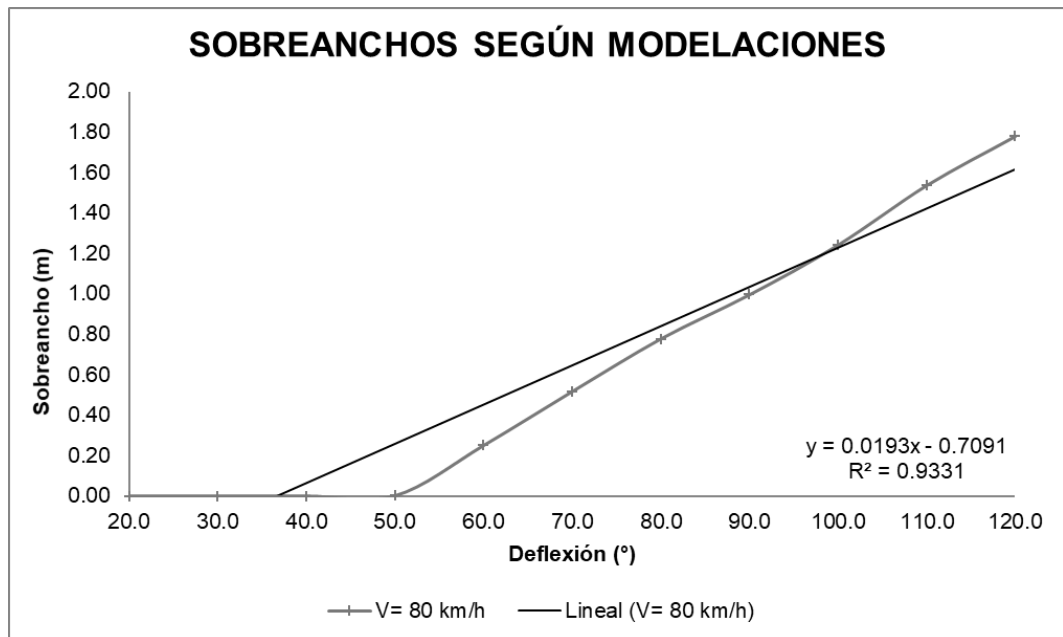


Figura 65. Nomograma sobreancho según modelaciones – Curva EE y V=80km/h
Fuente: Elaboración Autores

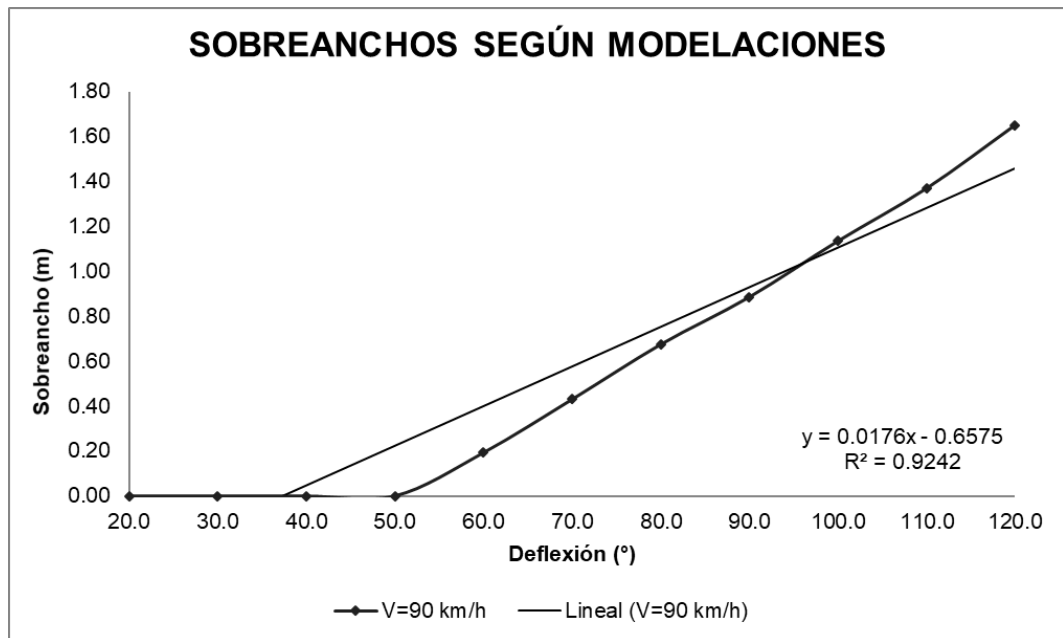


Figura 66. Nomograma sobreancho según modelaciones – Curva EE y V=90km/h
Fuente: Elaboración Autores

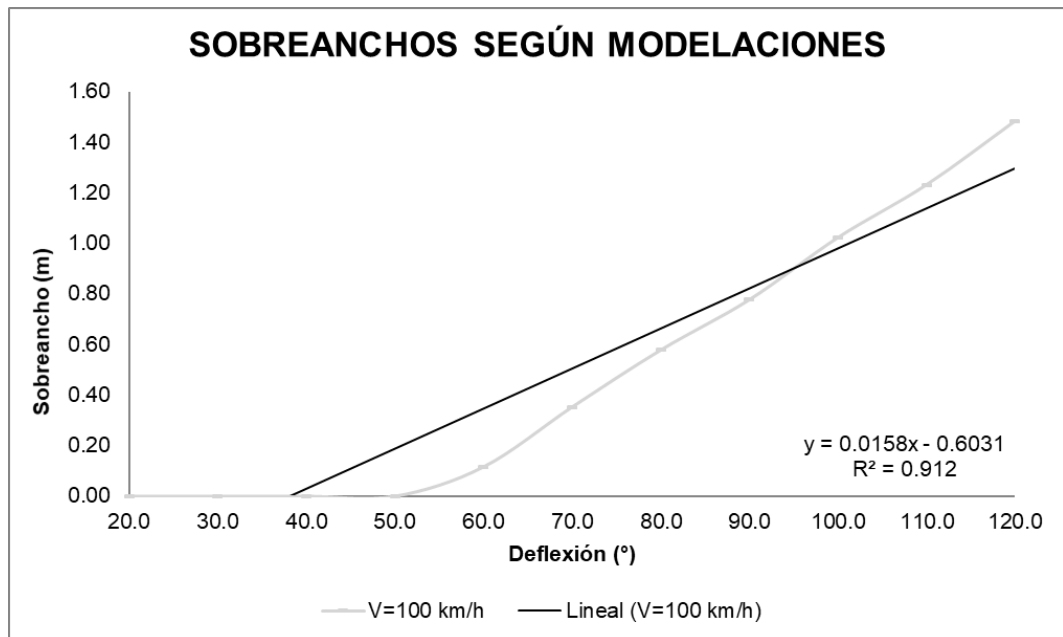


Figura 67. Nomograma sobreancho según modelaciones – Curva EE y V=100km/h
Fuente: Elaboración Autores

11.2. Curvas Espiral – Circulo – Espiral

11.2.1. Nomogramas de Sobreancho en Función de la Deflexión

De igual forma, que en el caso de las curvas espiral – espiral, en este numeral se presentan los nomogramas efectuados con base en los valores de sobreancho obtenidos bajo la metodología planteada por el manual de diseño geométrico del INVIAS de 2008 y las modelaciones efectuadas por Vehicle Tracking, en los cuales se presenta como variable independiente la deflexión y como variable dependiente el sobreancho para los diferentes para las diferentes velocidades evaluadas. En este punto es importante resaltar, que el manual de diseño geométrico del INVIAS 2008 no plantea formulaciones diferentes en función al tipo de curvatura evaluada es por ello que los datos reportados son iguales para los dos tipos de curvas estudiadas en esta investigación.

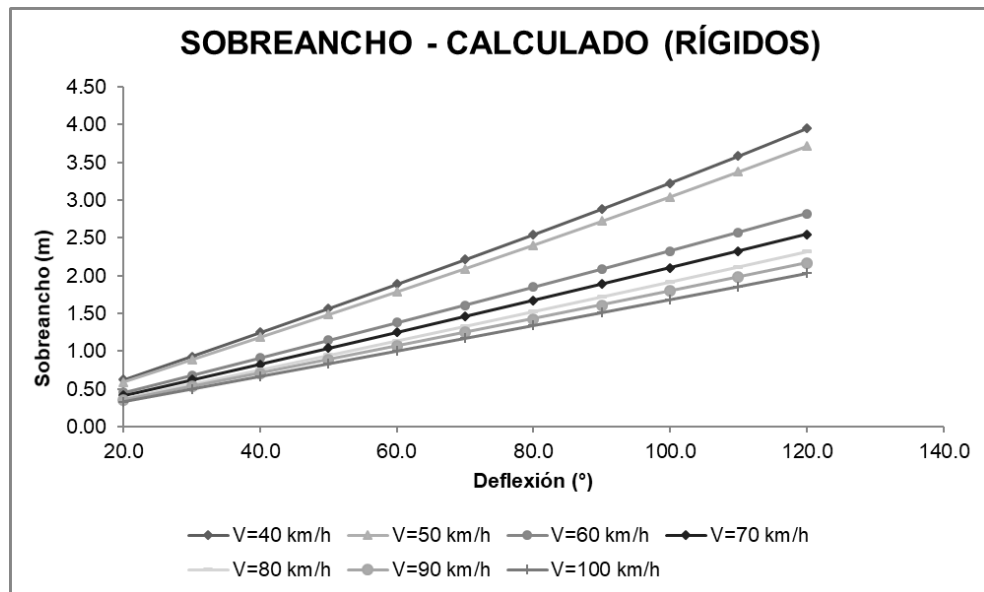


Figura 68. Cálculo para vehículos rígidos del Manual de Diseño de 2008 – Curva ECE
Fuente: Elaboración Autores

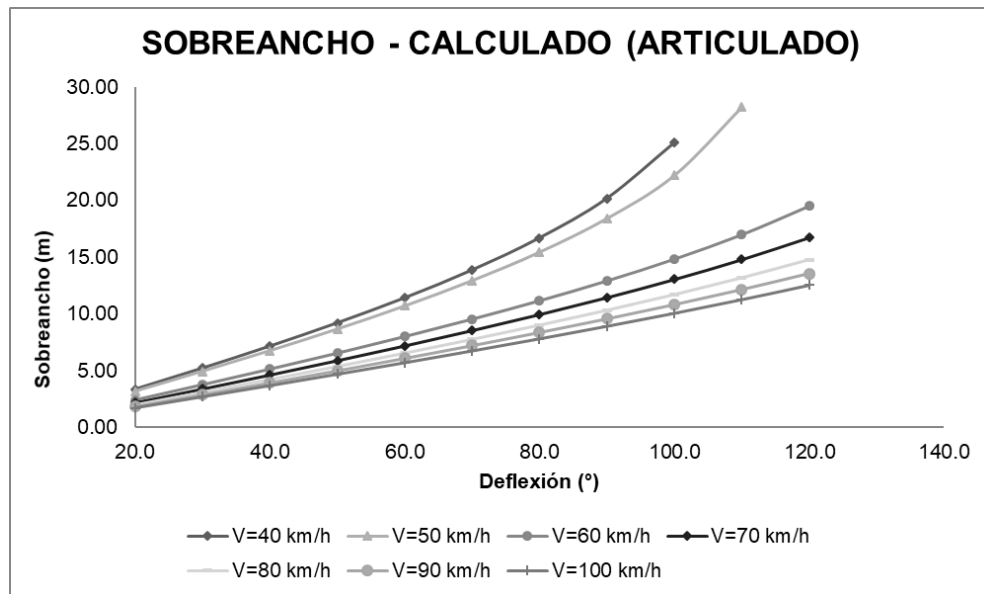


Figura 69. Cálculo para vehículos articulados del Manual de Diseño de 2008 – Curva ECE
Fuente: Elaboración Autores

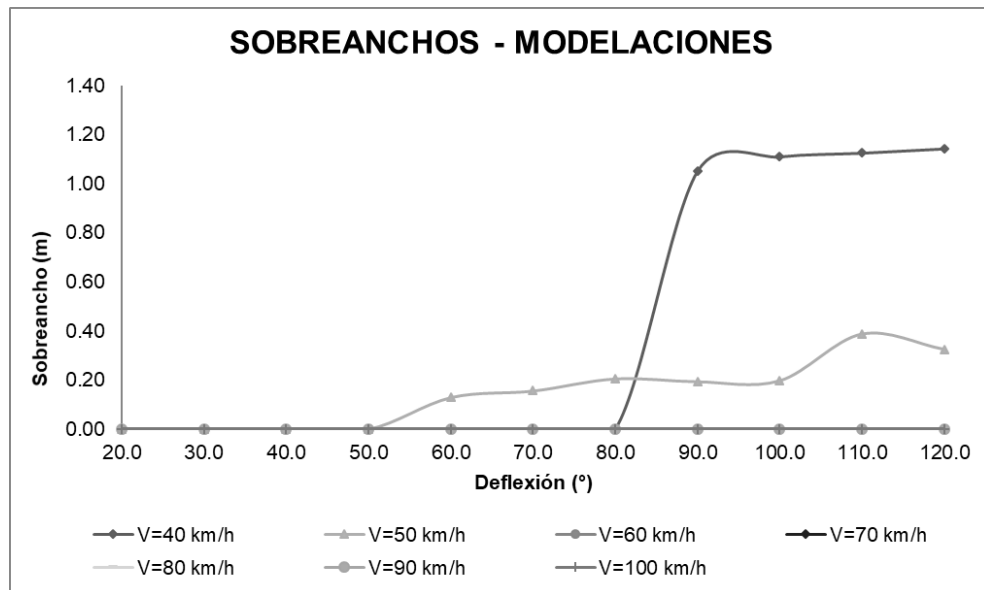


Figura 70. Modelaciones realizadas a través del Software Vehicle Tracking – Curva ECE
Fuente: Elaboración Autores

De acuerdo a los nomogramas presentados se puede evidenciar que, para el caso de los valores obtenidos bajo la metodología planteada por el manual de diseño geométrico de 2008, el aumento del sobreelevarse para todas las velocidades es proporcional al aumento de la deflexión. No obstante, tal y como se puede observar en el gráfico de modelaciones, para el caso de curvas espiral – círculo – espiral solo se reportan valores de sobreelevarse para velocidades bajas (40km/h y 50km/h) y para deflexiones a 80° y 50° respectivamente, y para el resto de velocidades y

deflexiones evaluadas en esta investigación el valor de sobreancho se vuelve nulo (0.0 m), este comportamiento se da una vez que este tipo de curva es un poco más abierta y suave que las curvas espirales lo que facilita la circulación de vehículos de grandes dimensiones.

Adicionalmente, se logra evidenciar en los datos obtenidos para las modelaciones que independiente de la metodología empleada se observa que los valores de sobreancho son mayores para velocidades bajas, en ese sentido y con el fin de evidenciar más claramente la variación del sobreancho para cada una de las velocidades evaluadas bajo las diferentes metodologías se presentan las gráficas para aquellas velocidades en donde se tiene valores de sobreancho según las modelaciones efectuadas.

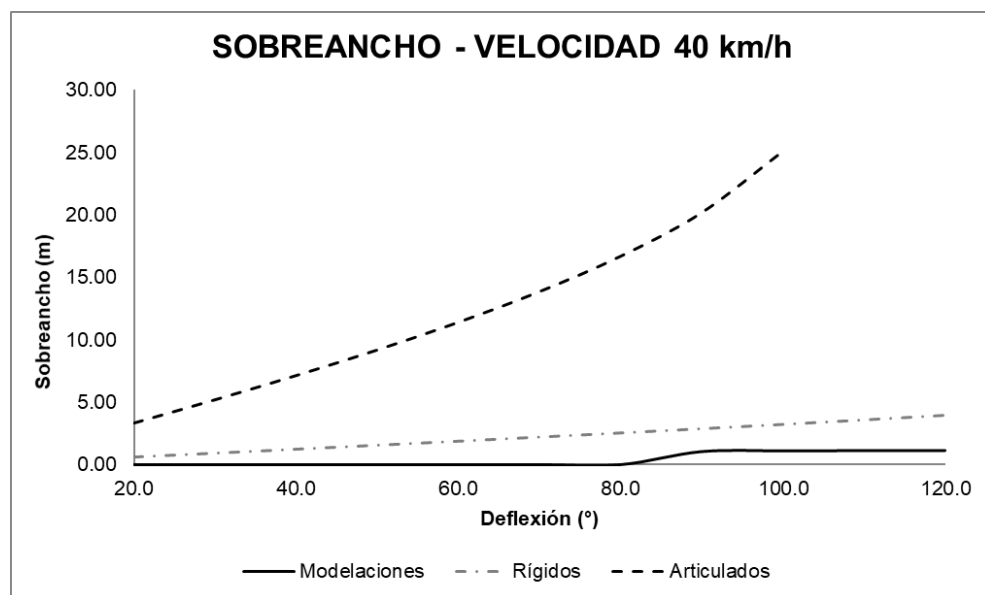


Figura 71. Nomograma comparación de métodos velocidad de 40km/h – Curva ECE
Fuente: Elaboración Autores

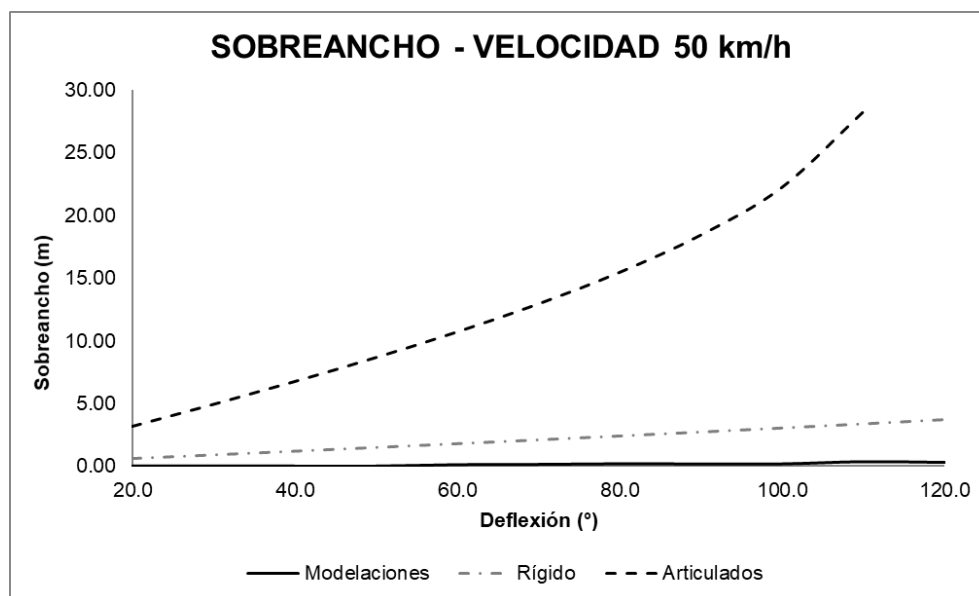


Figura 72. Nomograma comparación de métodos velocidad de 50km/h – Curva ECE
Fuente: Elaboración Autores

En los nomogramas anteriores, se logra evidenciar de manera más clara la diferencia en el valor de sobreancho encontrada por las diferentes formulaciones presentadas por el INVIAS (rígido y articulado) y las modelaciones efectuadas, logrando observar que los valores de sobreancho más bajo se obtienen bajo la metodología de modelaciones computacionales y los máximos valores se hallan bajo las formulaciones de vehículo articulado del manual de diseño del INVIAS, por último los resultados que se aproximan más a los valores obtenidos en las modelaciones con dimensiones reales son los hallados en los cálculos del INVIAS para vehículos rígidos.

11.2.2. Nomogramas de Sobreancho en Función de la Velocidad

Adicional a los nomogramas evaluados anteriormente se presentan las gráficas en donde se relaciona la variabilidad del sobreancho en función a la velocidad evaluada a lo largo de este documento, bajo la metodología enmarcada por el INVIAS y las modelaciones efectuadas de manera computacional.

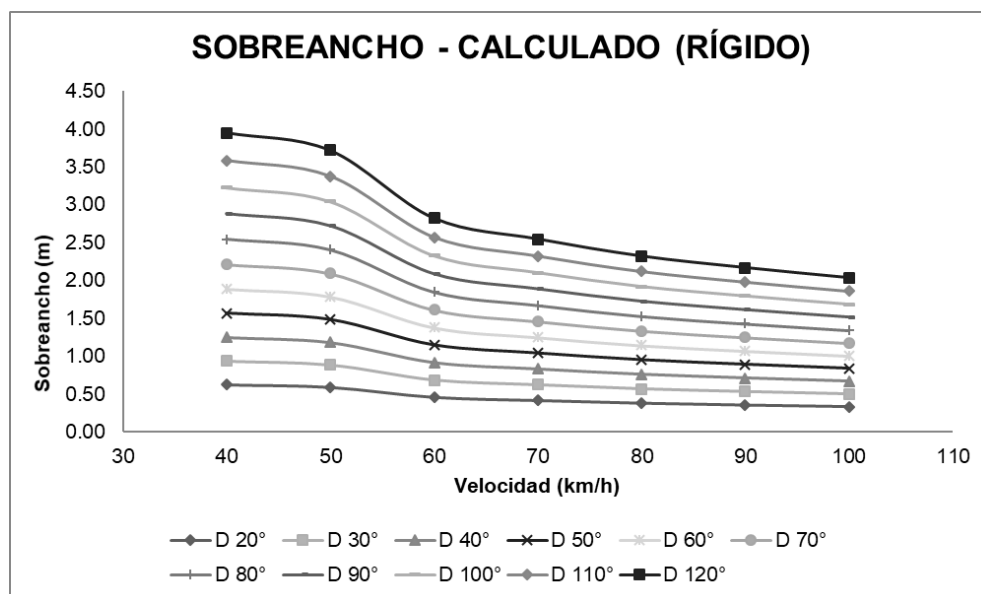


Figura 73. Cálculo para vehículos rígidos del Manual de Diseño de 2008 – Curva ECE
Fuente: Elaboración Autores

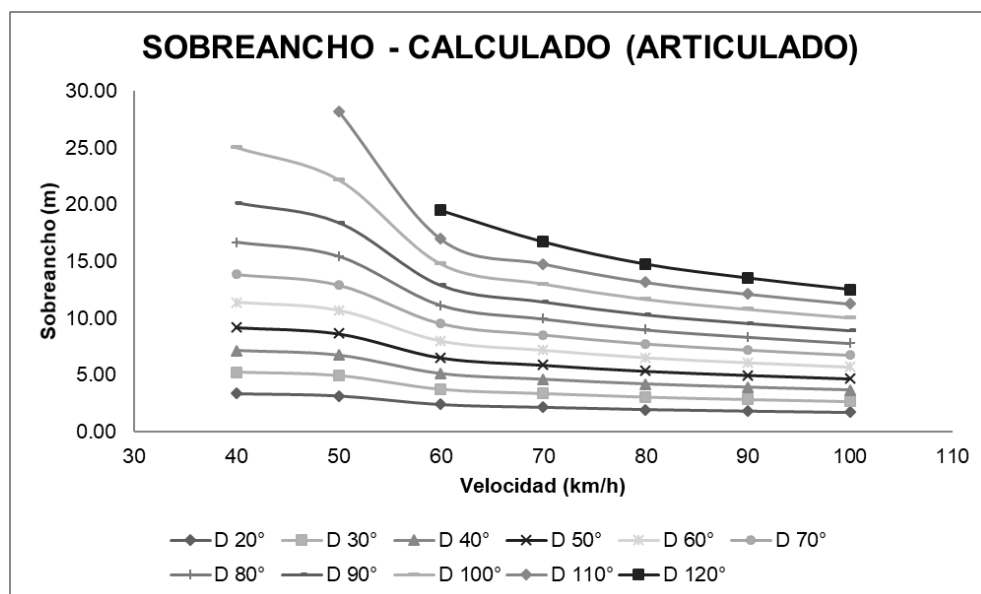


Figura 74. Cálculo para vehículos articulados del Manual de Diseño de 2008 – Curva ECE
Fuente: Elaboración Autores

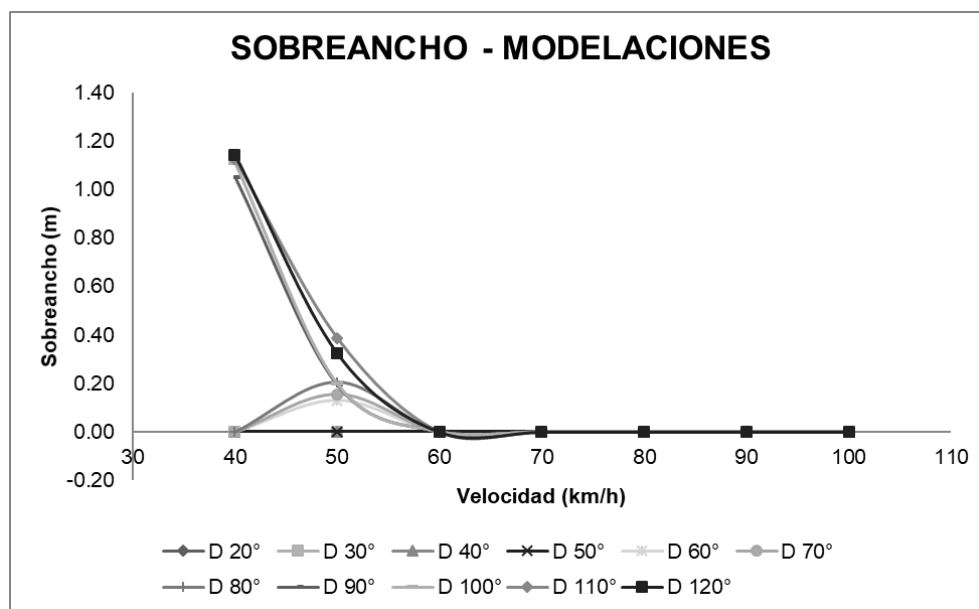


Figura 75. Modelaciones realizadas a través del Software Vehicle Tracking – Curva ECE
Fuente: Elaboración Autores

Según lo presentado en las gráficas antepuestas, se muestra la variabilidad del sobreancho en función a la velocidad para las diferentes deflexiones evaluadas, de manera que se puede evidenciar que para las tres metodologías de cálculo analizadas (INVIAS rígido y articulado – modelaciones) se presenta la misma tendencia en el comportamiento, en donde a mayor velocidad independientemente de la deflexión el valor de sobreancho decrece y en el caso de las modelaciones efectuadas a partir de 60km/h para todas las deflexiones el sobreancho es nulo.

A continuación, se presentan una serie de nomogramas en los cuales se puede evidenciar claramente las diferentes metodologías y sus diferencias en valores de sobreancho para la misma deflexión.

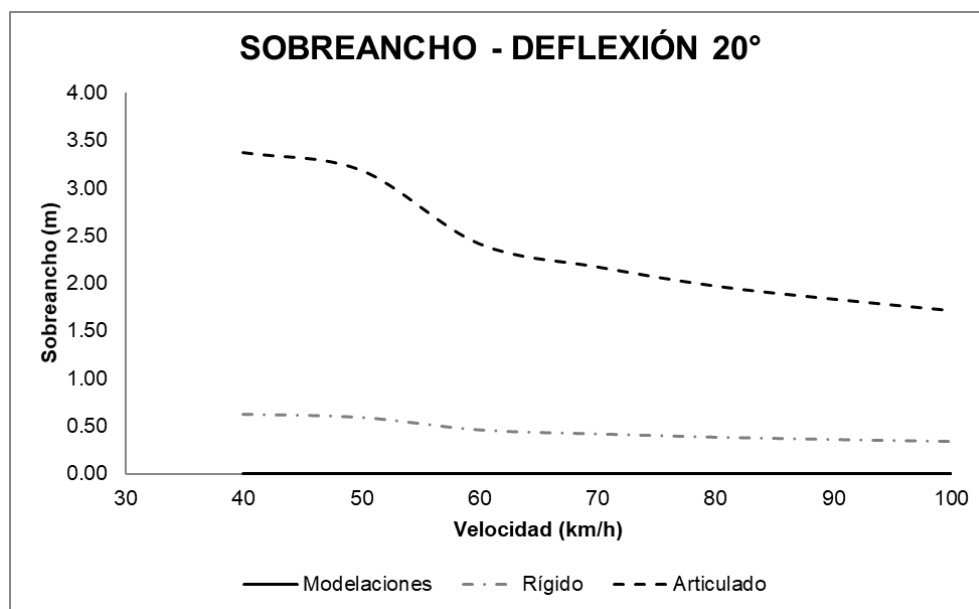


Figura 76. Nomograma comparación de métodos deflexión de 20° - Curva ECE
Fuente: Elaboración Autores

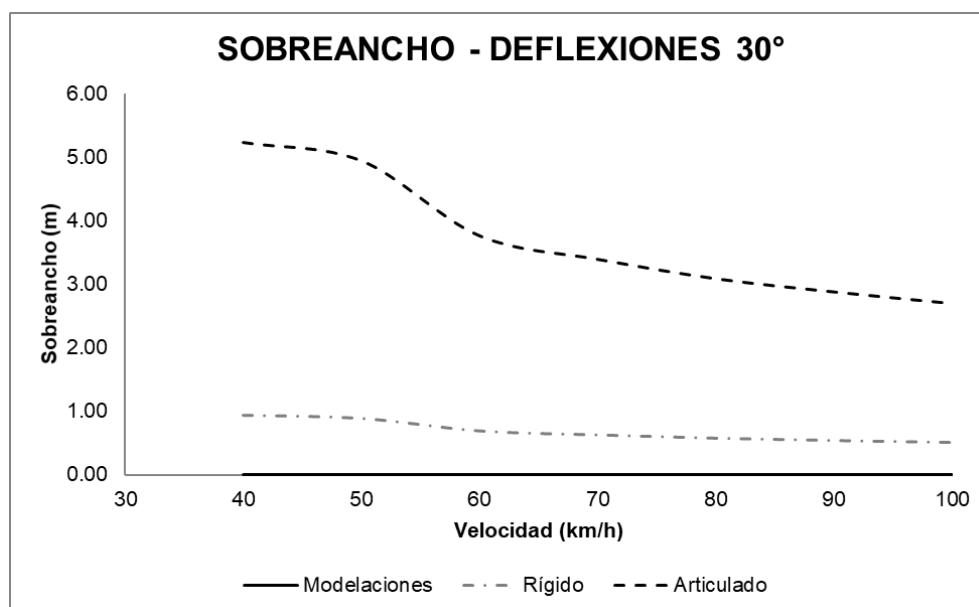


Figura 77. Nomograma comparación de métodos deflexión de 30° - Curva ECE
Fuente: Elaboración Autores

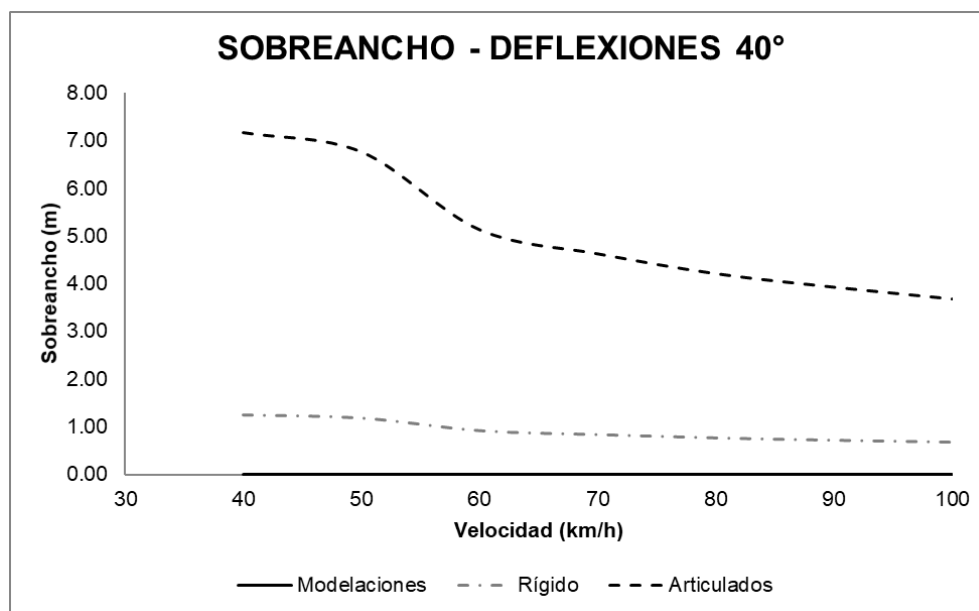


Figura 78. Nomograma comparación de métodos deflexión de 40° - Curva ECE
Fuente: Elaboración Autores

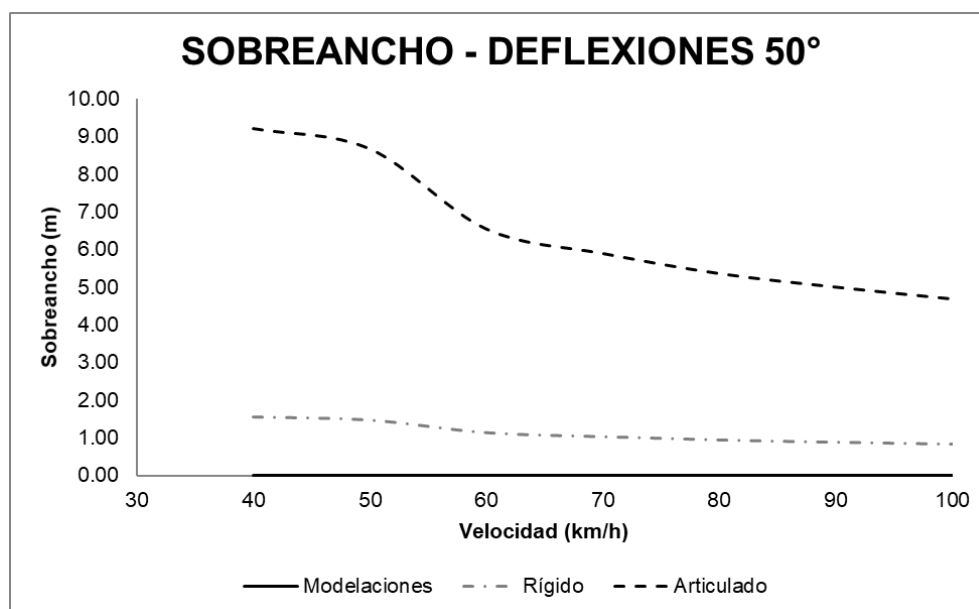


Figura 79. Nomograma comparación de métodos deflexión de 50° - Curva ECE
Fuente: Elaboración Autores

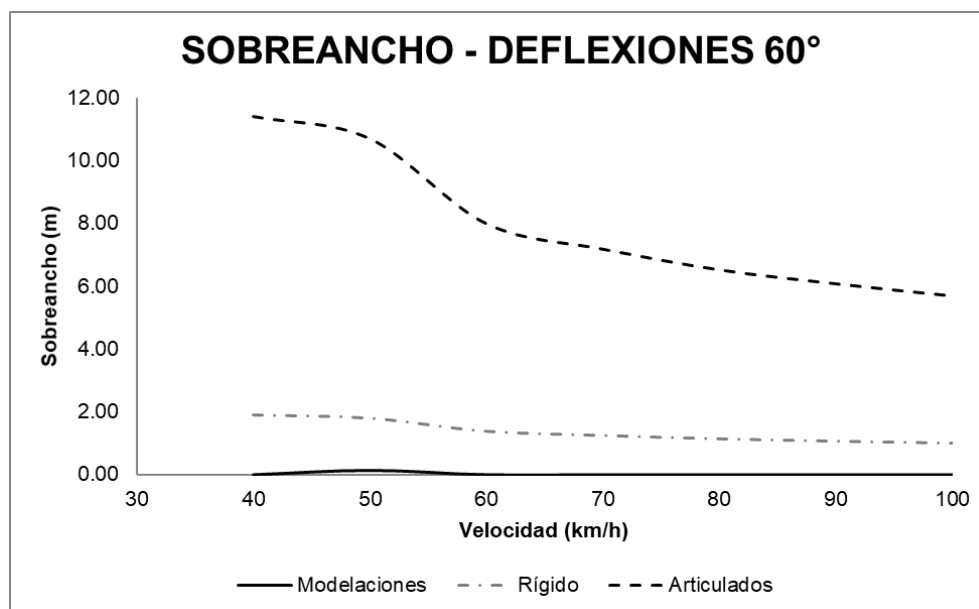


Figura 80. Nomograma comparación de métodos deflexión de 60° - Curva ECE
Fuente: Elaboración Autores

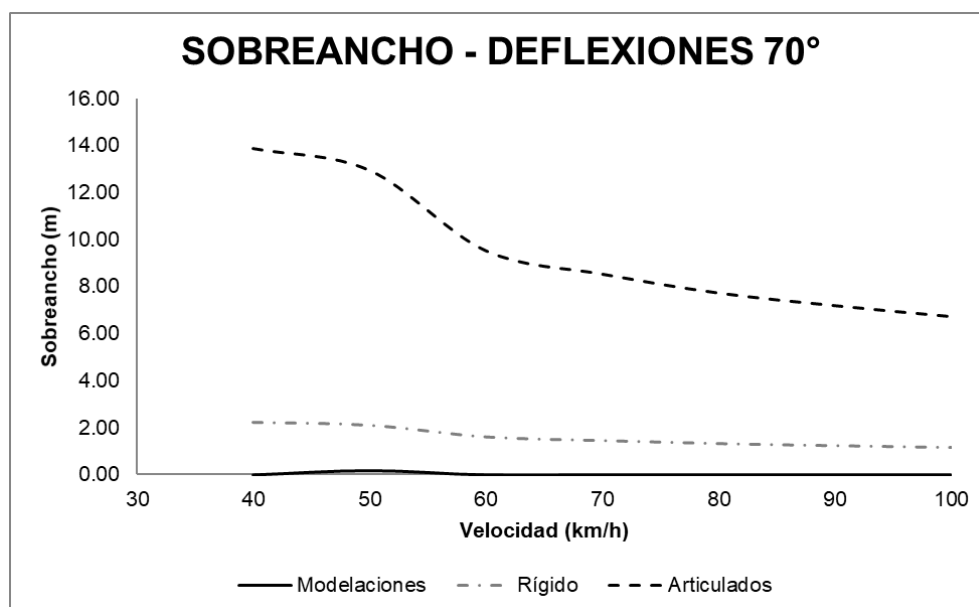


Figura 81. Nomograma comparación de métodos deflexión de 70° - Curva ECE
Fuente: Elaboración Autores

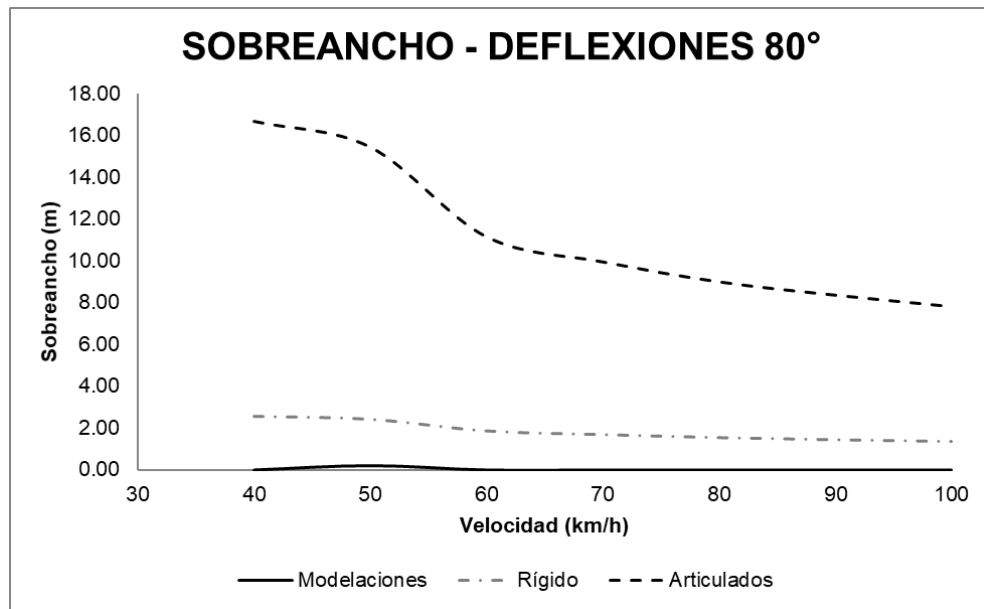


Figura 82. Nomograma comparación de métodos deflexión de 80° - Curva ECE
Fuente: Elaboración Autores

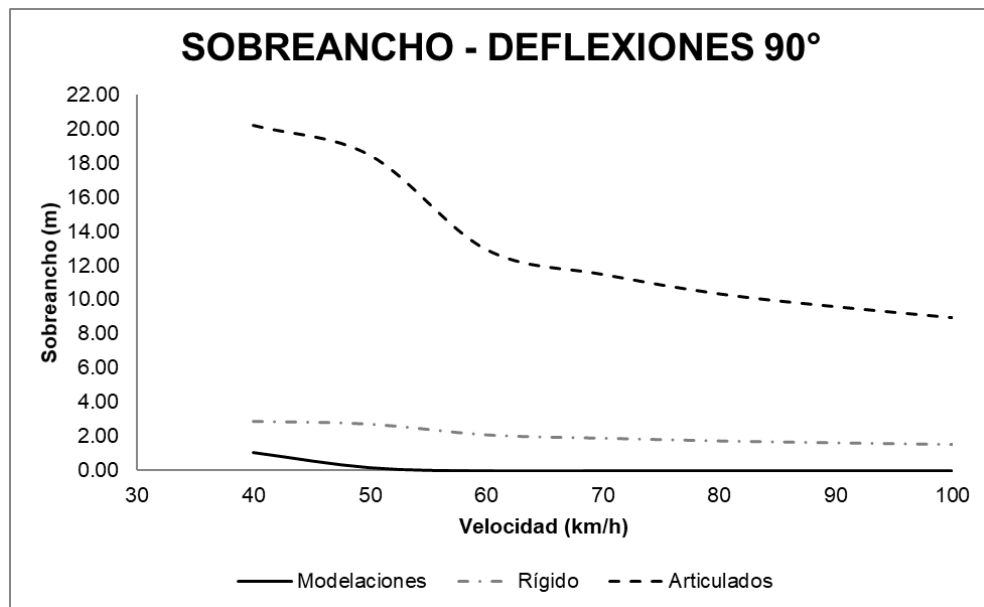


Figura 83. Nomograma comparación de métodos deflexión de 90° - Curva ECE
Fuente: Elaboración Autores

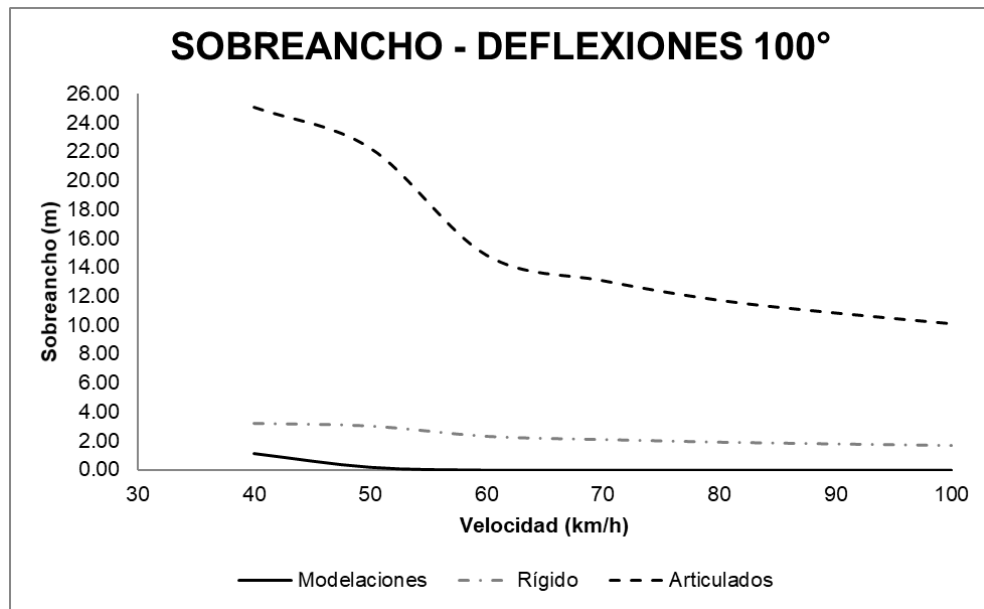


Figura 84. Nomograma comparación de métodos deflexión de 100° - Curva ECE
Fuente: Elaboración Autores

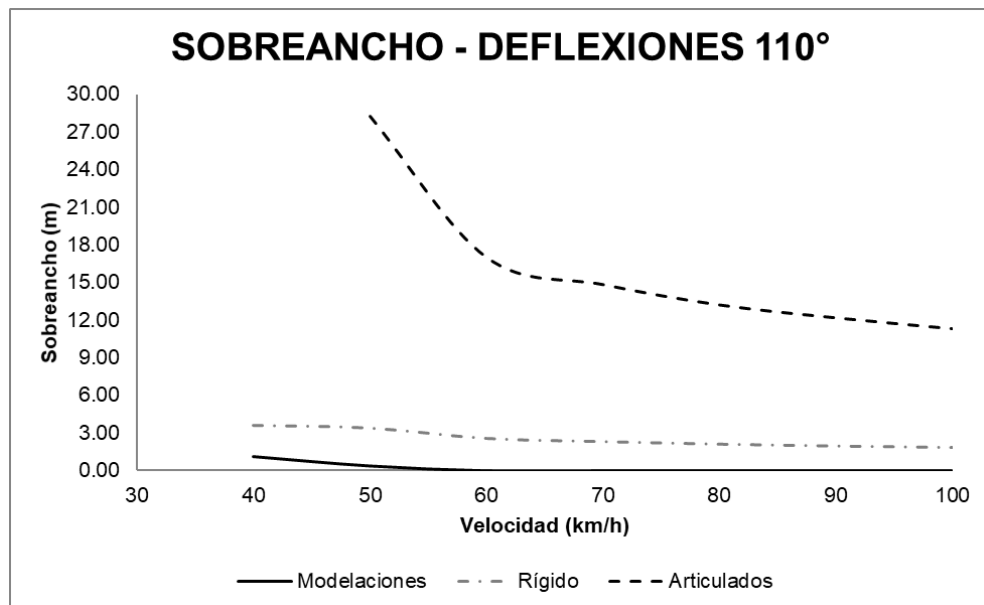


Figura 85. Nomograma comparación de métodos deflexión de 110° - Curva ECE
Fuente: Elaboración Autores

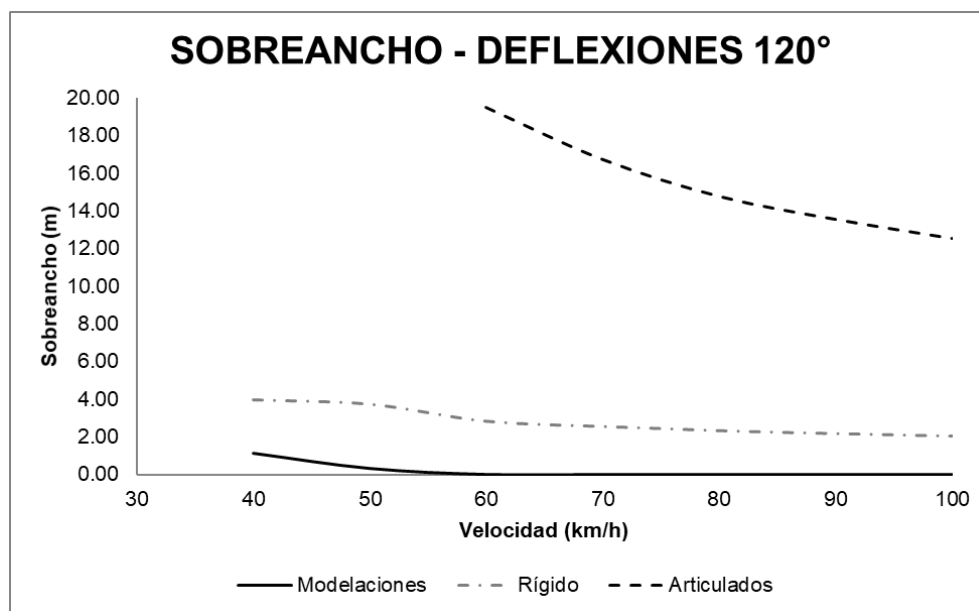


Figura 86. Nomograma comparación de métodos deflexión de 120° - Curva ECE
Fuente: Elaboración Autores

Como se puede demostrar en las figuras anteriores, se evidencia de manera clara que de las metodologías de cálculo evaluadas para la obtención de sobreancho, para todas las deflexiones y velocidades con la que se obtiene un mayor valor de sobreancho es con las formulaciones planteadas para los vehículos articulados de la metodología INVIAS versus al menor valor encontrado el cual se registra a través de las modelaciones computacionales efectuadas en donde solo se reportan valores de sobreancho continuos para las deflexiones superiores a 90° y velocidades de 40km/h y 50km/h.

11.2.3. Análisis Estadístico de los Resultados

Posterior a efectuar los cálculos y procedimientos necesarios para la obtención de valores de sobreancho, según lo presentado en el numeral 10, se lleva a cabo un análisis estadístico de los datos obtenidos y recolectados, de manera que se describen las principales variables estadísticas en la siguiente tabla.

Tabla 18 Resultados Análisis Estadístico – Curva ECE

VARIABLES ESTADISTICAS		SOBREANCHOS		
		RIGIDOS	MODELACIONES	ARTICULADOS
Cantidad de datos	n	77.00	77.00	74.00
Media aritmética	Media	1.60	0.08	9.43
Desviación típica poblacional	s	0.86	0.25	5.63
Desviación típica muestral	S	0.86	0.25	5.67
Suma de los "n" datos	Sx	123.42	6.03	697.55
Suma de los cuadrados	Sx ²	254.36	5.34	8923.26
Valor mínimo de los datos	Min	0.33	0.00	1.71
Cuartil 1	Q1	0.91	0.00	5.03
Mediana o Cuartil 2	Mediana	1.51	0.00	8.61
Cuartil 3	Q3	2.10	0.00	12.82
Valor máximo de los datos	Máx.	3.95	1.14	28.25

Fuente: Elaboración Autores

Como demostración, se calculan los valores medios, máximos y mínimos obtenidos para cada una de las metodologías en curvas espiral – círculo – espiral, sin embargo, para este caso no es posible asemejar ninguna de las metodologías de cálculo empleadas, una vez que los datos obtenidos tras las modelaciones en Vehicle Tracking son muy diversos entre sí.

Con el objetivo de evaluar la dispersión que tienen los datos en cada una de las metodologías efectuadas, se analizan la desviación poblacional y muestral, en donde para el caso de rígidos y modelaciones los valores resultantes son inferiores a 1.0 lo cual implica, que la dispersión de los valores de sobreancho no es representativa como en el caso de la evidenciada para el caso de las formulaciones aplicada en vehículos articulados.

11.2.4. Comparación de Metodología de pruebas piloto vs Formulaciones y Modelos Computacionales

De acuerdo al numeral 10, para los vehículos estudiados y con los cuales se efectuaron las modelaciones de prueba piloto, no se obtuvo valores de sobreancho para la curva seleccionada la cual correspondía a una curva, a una velocidad de 50km/h y con una deflexión de 100°, es por ello el análisis para este tipo de curvas solo se realizó comparando las metodologías computacionales y las formulaciones presentadas en el manual de diseño geométrico de 2008 mostradas anteriormente.

11.2.5. Propuesta Calculo de Sobreancho

Para el caso de las curvas espiral-circulo-espiral, la única metodología de las analizadas en esta investigación que presenta valores de sobreancho continuos para todas las deflexiones y velocidades es la planteada en el Manual de Diseño Geométrico del INVIAS de 2008, sin embargo, y teniendo en cuenta que el manual no plantea formulaciones específicas y diferentes para cada tipología de curva, estos datos no se consideran representativos. Adicionalmente, tras efectuar las modelaciones computacionales como las de la prueba piloto, se evidencio en estas primeras que solo es necesario contar con sobreancho para pequeñas velocidades (40km/h y 50km/h) y, para el segundo caso (modelaciones pruebas piloto) que no es necesario contar con valores de sobreancho con el fin de garantizar la correcta circulación de vehículos de carga pesada (en este caso C3S2), no obstante es importante tener en cuenta que en las modelaciones computacionales no se reporta un valor más próximo, debido a que el vehículo empleado en la verificación de la prueba piloto no contempla las mismas dimensiones que el vehículo de diseño empleado en el manual del INVIAS de 2008, y con el cual se efectuaron las modelaciones computacionales.

Debido a lo anterior, y con el fin de generar una propuesta de cálculo para la obtención del sobreancho, se presenta una serie de nomogramas en donde se relaciona los valores de deflexión con el sobreancho para las diferentes velocidades analizadas en este estudio con base en los resultados obtenidos a partir de las modelaciones computacionales. Adicionalmente y con el objetivo de generar una formulación específica para cada caso, se presenta la línea de tendencia con su respectiva formulación y coeficiente de determinación (R^2) el cual para el caso de las curvas espiral-circulo-espiral fue superior a 70% lo que implica una buena calidad del modelo y una buena aceptación de emplear la formulación para la obtención de los valores de sobreancho en diferentes deflexiones.

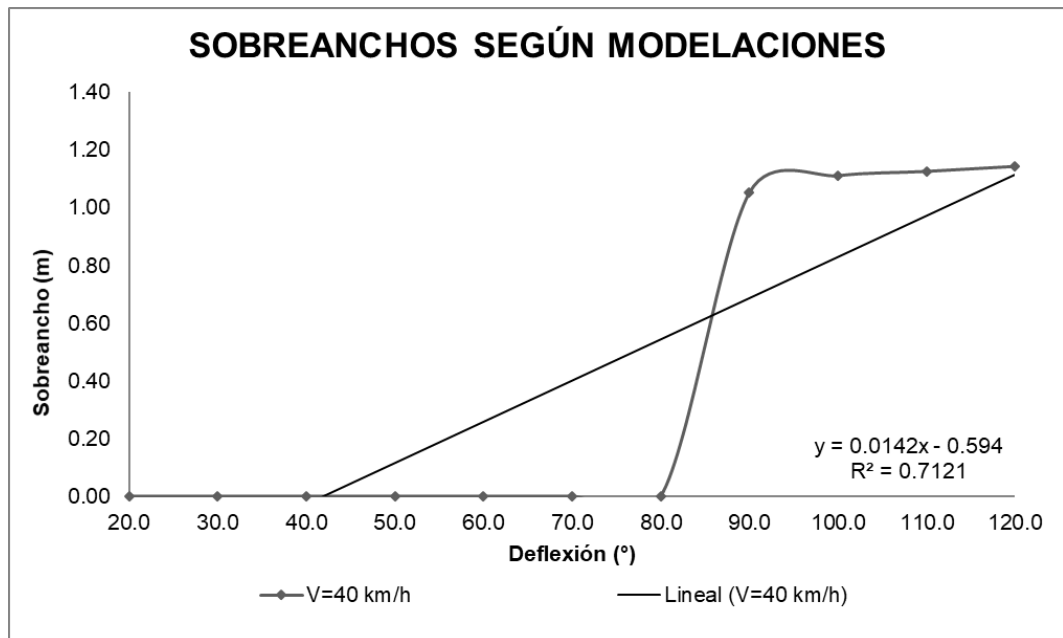


Figura 87. Nomograma sobreancho según modelaciones – Curva ECE y V=40km/h
Fuente: Elaboración Autores

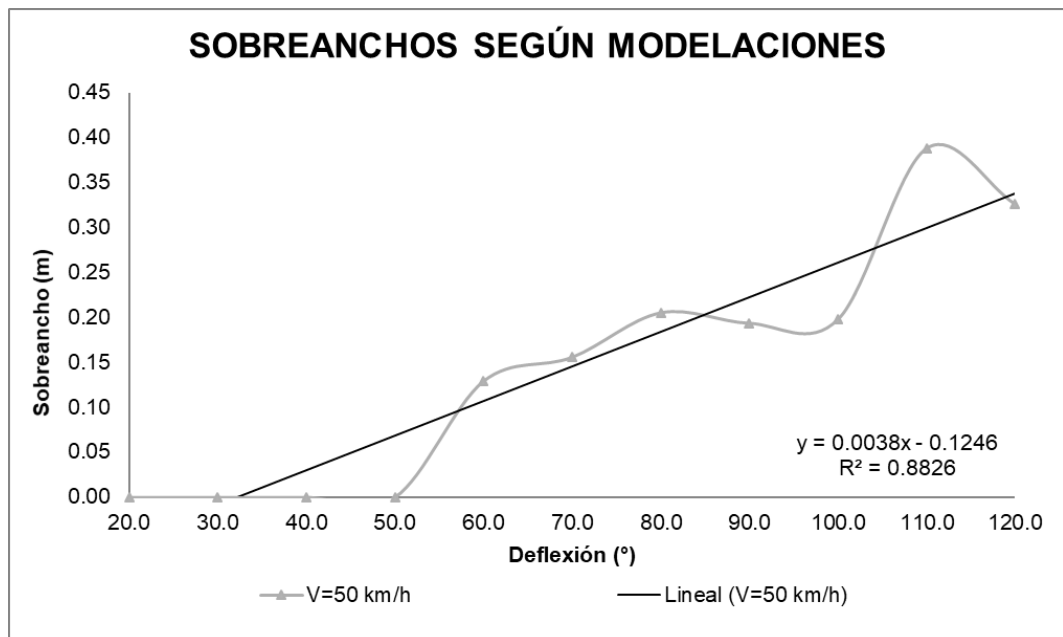


Figura 88. Nomograma sobreancho según modelaciones – Curva ECE y V=50km/h
Fuente: Elaboración Autores

11.3. Impacto Social

Como se ha evidenciado a lo largo de esta investigación la orientación que tiene la misma es netamente técnica y aplicada a la modificación de metodologías empleadas para el cálculo del sobreancho en las vías del territorio colombiano, basado en la obtención de formulaciones matemáticas. Es por ello que este estudio, no genera ni incide de manera directa en el ámbito social, una vez que no se está mejorando o modificando las condiciones de vida de los usuarios de las vías en Colombia.

11.4. Impacto Ambiental

La investigación presentada genera un impacto positivo desde el área ambiental, una vez que actualmente la metodología empleada para generar las definiciones de este parámetro geométrico durante diseño conllevan a un aumento de la sección transversal de la vía, ya que el valor obtenido por parte del manual del INVIAS es de grandes proporciones, y teniendo en cuenta la topografía colombiana, en su mayoría montañosa, implica que al momento de construcción se genere un mayor corte en laderas y por ende el movimiento de tierras incrementa de manera significativa, conllevando a la generación de zonas de disposición de materiales provenientes de excavación (ZODME) mayores, generando impactos ambientales ascendentes. Adicionalmente, con la metodología de cálculo que actualmente se emplea se establecen posibles cambios en el suelo, es decir, una modificación al uso del suelo del territorio donde se lleve a cabo el proyecto.

Dado lo anterior, con la investigación presentada se evidencia que las distancias necesarias para el sobreancho son menores a las establecidas por el manual de diseño geométrico del INVIAS, razón por la cual, los cortes necesarios para la construcción vías se verán reducidos, y por ende los cortes a efectuar, generando mayor seguridad a los usuarios del proyecto y un menor movimiento de tierras, con lo cual se pueden generar franjas ambientales menores salvaguardando la biodiversidad del territorio colombiano.

12. HERRAMIENTA ACADÉMICA

Una vez efectuados los cálculos de sobreancho por diferentes metodologías, las cuales enmarcan lo descrito por el manual de diseño geométrico del INVIAS de 2008 y los resultados obtenidos de las modelaciones efectuadas por el software vehicle tracking, se desarrolla un programa computacional por medio del software Microsoft Visual Studio 2019, en la versión gratuita community para estudiantes y colaboradores, cuyo objetivo central es efectuar el cálculo del sobreancho basado en las metodologías planteadas anteriormente, en ese sentido para su ejecución se tuvo en cuenta las siguientes hipótesis de diseño:

1. El programa está diseñado únicamente para evaluar el sobreancho requerido para camiones tipo C3S2 y cuyas dimensiones sean iguales o muy cercanas a las propuestas por el manual de diseño geométrico de 2008 del INVIAS.
2. El programa se diseñó para un tipo de vías bidireccional de un solo carril en cada sentido, con ancho de calzada de 7.3m, lo cual implica un ancho de carril de 3.65m.
3. Las ecuaciones empleadas para el cálculo del sobreancho para vehículos articulados y rígidos, sigue las premisas estipuladas en el manual de diseño geométrico de 2008 del INVIAS y descritas a lo largo de este documento.
4. Con respecto a las formulaciones utilizadas para el cálculo del sobreancho de acuerdo a la modelaciones efectuadas en el software Vehicle Tracking, son el resultado de la realización de una serie de nomogramas para cada uno de los tipos de curva analizados y las velocidades estudiadas, en donde se deja como variable independiente la deflexión y variable dependiente el valor de sobreancho, tal y como se presentan en los numerales 11.1.5 y 11.2.5 del presente documento.

Teniendo en cuenta las hipótesis de diseño, a continuación, se presentan y se describen cada una de las ventanas generadas por el programa realizado, así como la información que debe ser ingresada por el usuario, no obstante, en el Anexo 6 Herramienta Académica se presenta el manual de uso detallado así como el programa generado.

1. La primera ventana corresponde a la portada del programa en donde se encuentra el título, el escudo de la Universidad Santo Tomás, y los autores, tal y como se observa a continuación:

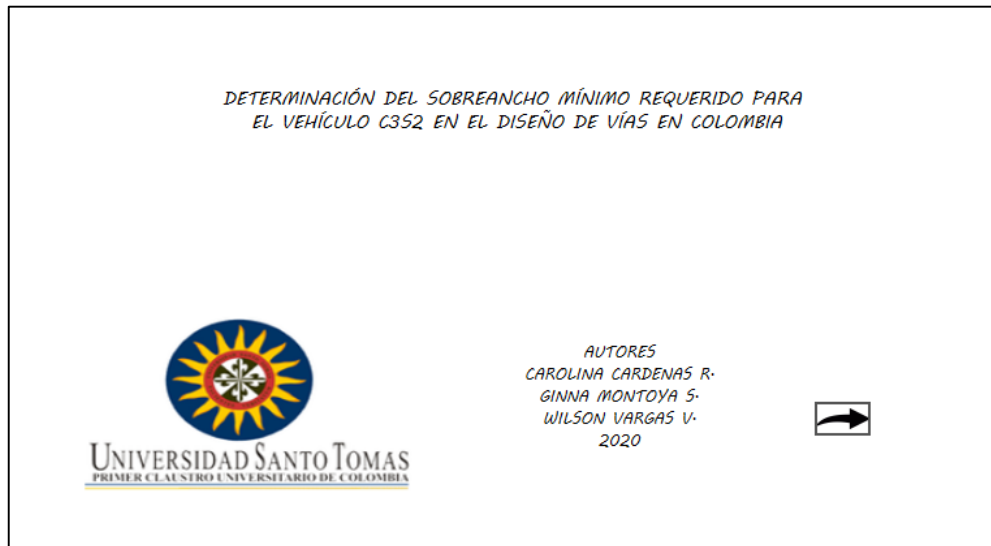


Figura 89. Primera ventana – presentación herramienta académica determinación de sobreancho
Fuente: Elaboración Autores

2. La segunda ventana corresponde a los parámetros de entrada, esta cuenta con listas desplegables en las cuales el usuario podrá seleccionar o ingresar la información base para el cálculo del sobreancho, de la siguiente manera:

Tipo de Curva: Lista desplegable en la que el usuario podrá seleccionar entre: Espiral – Espiral / Espiral – Circulo – Espiral.

Velocidad (km/h): Lista desplegable en la que el usuario podrá seleccionar entre: 40 / 50 / 60 / 70 / 80 / 90 / 100.

Angulo de Deflexión: Esta variable será ingresada por el usuario en número entero.

Vehículo: Tal y como se enuncio en las premisas el programa solo efectuara cálculos para el vehículo C3S2, es por ello que se aclara en el programa la siguiente nota: “Las dimensiones tenidas en cuenta para los cálculos son las presentadas en la figura.”

DETERMINACIÓN DEL SOBREALCHO MÍNIMO REQUERIDO PARA EL VEHÍCULO C3S2 EN EL DISEÑO DE VÍAS EN COLOMBIA

PARÁMETROS DE ENTRADA

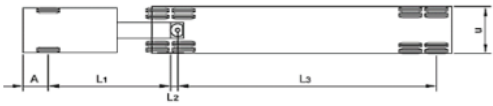
TIPO DE CURVA:

VELOCIDAD (km/h):

ÁNGULO DE DEFLEXIÓN (°):

VEHÍCULO:

Nota: Las dimensiones tenidas en cuenta para los cálculos son las presentadas en la Figura 1.



Vehículo	Categoría	A (m)	L1 (m)	L2 (m)	L3 (m)	L4 (m)
C3S2	Tractocamión de tres ejes con semirremolque de dos ejes	1,22	5,95	0,00	12,97	2,59

Figura 1. Vehículo C3S2 dimensiones. Fuente: Manual de diseño geométrico

Figura 90. Segunda ventana – parámetros de entrada herramienta académica determinación de sobrealcho
Fuente: Elaboración Autores

- La tercer y última ventana corresponde al cálculo de sobrealcho, en donde se presentan los resultados obtenidos por diferentes metodologías de cálculo, en ese sentido la ventana se visualiza de la siguiente manera.

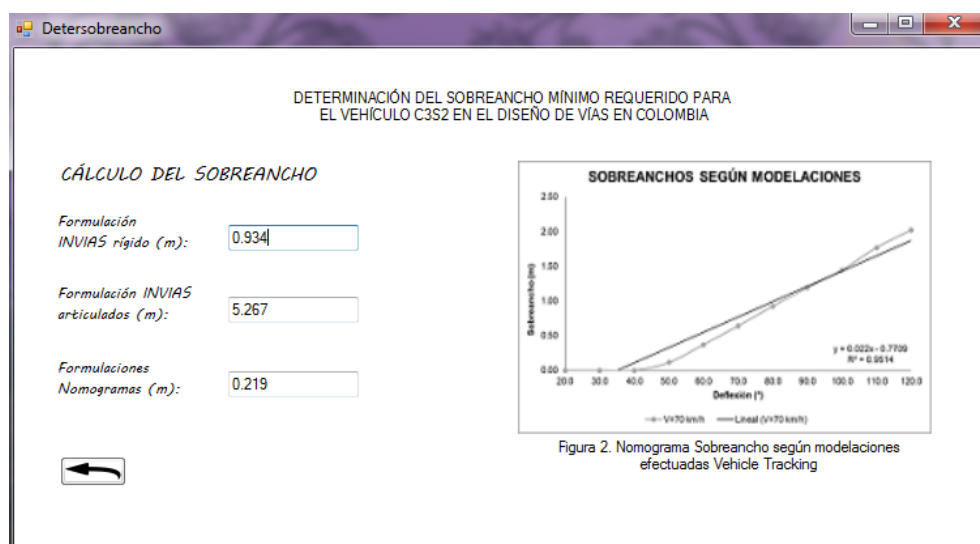


Figura 91. Tercera ventana – cálculo de sobrealcho herramienta académica determinación de sobrealcho
Fuente: Elaboración Autores

Se aclara que la Figura 2 (del programa) correspondiente al nomograma, este se modifica y se reporta en esta ventana en función a los datos de velocidad y tipo de curva ingresados por el usuario.

13.CONCLUSIONES

Una de las primeras acciones realizadas, fue la caracterización de las curvas horizontales y de los vehículos de mayor envergadura que transitan por las vías colombianas, es por ello que en los capítulos 9 y 10 del documento se evidencian las características de las curvas horizontales empleadas para esta investigación, así como las diferentes mediciones efectuadas a vehículos de carga pesada que transitan actualmente en Colombia. En donde se demostró que, para el caso del vehículo, los anchos de cada tracto camión son variables dependiendo del semirremolque que transporten, siendo este factor un atenuante importante que incide de manera directa en el cálculo de los sobreanchos debido a que los giros de los vehículos en las curvas se debe contar con el espacio de la carga aumentando considerablemente el sobreancho requerido. Adicionalmente, se observa que las medidas con la que actualmente cuenta el manual de diseño geométrico del INVIAS no corresponden a los vehículos de mayor envergadura que se presentan en el parque automotor de Colombia, por lo cual se considera apropiado efectuar una modificación a dichas dimensiones ya que como se enuncio estas son un factor principal para la correcta determinación del sobreancho.

Tras contar con la caracterización de las curvas a analizar, y la realización de una serie de modelaciones computacionales empleando el software vehicle tracking para las dos tipologías de curvas, con deflexiones que varían entre 20° y 120° y velocidades entre 40km/h y 100km/h, en donde se pueden estimar las siguientes apreciaciones para cada una de las curvas:

- Curvas Espiral- Espiral

Se evidencia que para todas las velocidades evaluadas para las deflexiones de 20° y 30° no se hace necesario contar con un parámetro de sobreancho y que solo a partir de una deflexión de 60° para todas las velocidades de diseño se requiere contar con un valor para el parámetro estudiado. Adicionalmente, se observa que para una misma deflexión a medida que incrementa la velocidad de diseño el sobreancho necesario se hace menor y a su vez, para una misma velocidad a medida que incrementa el ángulo de deflexión de la curva se hace necesario un mayor sobreancho.

- Curvas Espiral-Circulo-Espiral

Se evidencia que para las deflexiones de 20° con velocidades de 40km/h a 60km/h y velocidad de 40 km/h entre deflexiones de 30° a 50°, se presenta la nota: “No es posible efectuar la curva”, es decir no se pudo trazar en civil.

Adicionalmente, se observa la nota “No cumple” la cual se presenta para las deflexiones de 20° a 80° y velocidades de 40km/h a 90 km/h, esta anotación se debe a que en el momento de efectuar la verificación de longitud en el programa Civil el segmento correspondiente a la zona circular presenta una longitud de curva inferior a la calculada y requerida de acuerdo a lo estipulado en las formulaciones del manual de Diseño Geométrico del INVIAS de 2008.

Por último, en esta tipología de curvas se muestra, que para la mayoría de las velocidades no es necesario contar con una longitud adicional al ancho de carril para que un camión C3S2 circule de manera adecuada dentro de la vía, en ese sentido, solo es necesario contar con sobreancho en curvas diseñadas a bajas velocidades y grandes ángulos de deflexión, siendo el sobreancho máximo de 1.14m (hallado en un ángulo de deflexión de 20° y velocidad de 40km/h) y mínimo sobreancho de 0.13m (hallado en un ángulo de deflexión de 60° y velocidad de 50km/h).

A partir de los datos obtenidos se realizó un análisis estadístico para dichos resultados, de los cálculos efectuados por medio de las formulaciones presentadas por el INVIAS para vehículos rígidos y articulados, así como las efectuadas por medio de las modelaciones computacionales para cada una de las curvas, en donde para cada una de ellas, se hace común lo observado tras analizar la desviación poblacional y muestral, los valores resultantes para el caso de sobreanchos en vehículos rígidos y en las modelaciones son inferiores a 1.0 lo que implica, que la dispersión de los valores de sobreancho no es representativa, opuesto a lo sucedido con los cálculos efectuados para vehículos articulados, en donde las desviaciones son mayores a 5.0.

Una vez obtenidas las diferencias porcentuales entre metodologías, se realizó la escogencia de una curva específica para cada una de las tipologías estudiadas, en el caso de las curvas espiral-espiral se planteó en la prueba piloto, la curva cuya deflexión es de 50° y una velocidad de 70 km/h y para el caso de las curvas espiral-circulo-espiral la curva correspondiente a una deflexión de 100° y velocidad de 50 km/h. Tras circular diferentes vehículos de carga pesada (C3S2 y C3S3), se logró comprobar que para el caso de las curvas espiral-espiral se requiere un sobreancho máximo de 0.50m y para el caso de las curvas espiral-circulo-espiral no es necesario contar con esta distancia adicional a partir del borde de carril.

Tomando como punto de partida los resultados obtenidos para las curvas específicas mencionadas anteriormente se realizó la comparación entre los resultados obtenidos bajo las tres metodologías (manual de diseño, modelaciones computacionales y modelaciones de prueba piloto) se observó que para el caso de curvas espiral-espiral el valor de sobreancho obtenido en la modelación de las pruebas piloto se encuentra entre lo reportado por las modelaciones computacionales y lo obtenido bajo los cálculos para vehículos rígidos de acuerdo

al manual de diseño geométrico de 2008 y para el caso de las curvas espiral-circulo-espiral, no se hace necesario contar con un distancia adicional denominada sobreancho.

Se logró evidenciar que un parámetro que no es posible tener en cuenta a la hora de efectuar el cálculo del sobreancho de manera numérica pero que es primordial, se trata de la pericia y tipo de maniobra del conductor, ya que este componente es importante para cada giro en curva, puesto que dependiendo del manejo adecuado por el conductor no hace necesario el ocupar espacio adicional.

En función a lo anterior, se realizó un análisis y estudio de las diferentes variables que llevan a la definición del sobreancho para curvas horizontales en Colombia, tomando como referencia el vehículo de mayor circulación y dimensión que transita por los diferentes carreteables en el territorio nacional. Observando a partir de las modelaciones efectuadas en la prueba piloto, y en Vehicle Tracking que para el caso de curvas espiral-espiral, el sobreancho requerido es menor a lo estipulado por el Manual de Diseño Geométrico del INVIAS de 2008 y para el caso de curvas espiral-circulo-espiral no requieren de una distancia adicional al ancho del carril (sobreancho) para poder circular de manera adecuada y sin generar algún tipo de invasión al carril aledaño.

En conclusión, con los cálculos obtenidos, las evidencias encontradas, se efectuó una herramienta académica por medio del software Microsoft Visual Studio 2019 en la versión gratuita community para estudiantes y colaboradores, la cual busca efectuar el cálculo del sobreancho basado en las metodologías planteadas en la investigación, que permitan que el diseñador pueda comparar de manera directa los valores obtenidos de sobreancho y así poder efectuar un diseño geométrico más óptimo y de mayor eficacia, salvaguardando la seguridad de los usuarios y la viabilidad del proyecto desde el área ambiental al ver reducida la sección transversal de diseño.

14.RECOMENDACIONES

Se recomienda hacer un levantamiento del parque automotor vigente que circula en el territorio nacional y evaluar una ficha por cada vehículo en la sección de semirremolques con las dimensiones reales, ya que este factor incide en la determinación del sobreancho requerido en las vías.

Se exhorta, en futuras investigaciones evaluar esta variable geométrica (sobreancho), para la nueva clase de vías que se están construyendo actualmente, es decir, para vías doble calzada que cuenten con dos o más carriles en cada sentido, adicionalmente que se evalúe este parámetro de diseño en el caso de túneles carreteables y cómo modificaría este la sección transversal de este tipo de obras en infraestructura.

Adicionalmente, se sugiere que la herramienta académica presentada con este trabajo de grado sea mejorada, de manera tal que puedan efectuar cálculos de sobreancho no solo para vehículos de gran envergadura, específicamente para el evaluado a lo largo de esta investigación (C3S2), sino que a su vez pueda realizar el cálculo para diferentes tipos de vehículo, en donde el usuario pueda ingresar estas características y el software arroje los resultados obtenidos.

Se recomienda tener en cuenta la presente investigación, así como los estudios realizados para la modificación del nuevo (actualización) manual de diseño geométrico del INVIAS en Colombia, con el fin de hacer diseños más óptimos y eficaces.

15. BIBLIOGRAFÍA

- Agudelo Ospina, J. J. (2008). *Diseño computarizado de carreteras*. Medellín, Colombia: Fondo Editorial Universidad EAFIT.
- Agudelo, J. J. (2002). *Diseño Geométrico de vías ajustado al manual colombiano*. Trabajo de grado (Especialista en vías y transporte), Universidad Nacional de Colombia. Facultad de minas., Medellín. Recuperado el 2018.
- ARQHYS.COM. (Diciembre de 2012). *Sobreancho de vía y su Transición*. Recuperado el 08 de Agosto de 2019, de <http://www.arqhys.com/construccion/via-sobreancho.html>
- Blazquez, L. B., & García, J. F. (2000). *Manual de carreteras. Volumen II* (Vol. II). (C. d. Ortiz e Hijos, Ed.) España, ESPAÑA: Universidad de Alicante. Departamento de Ingeniería de la Construcción, Obras Públicas e Infraestructura Urbana. Recuperado el 10 de JULIO de 2018, de <http://hdl.handle.net/10045/1787>
- Cañon Buitrago, E. D. (2018). Radios de giro en camiones articulados para diseño vial urbano en Colombia. 123. Colombia: Universidad Santo Tomás.
- Cárdenas, Y. C., & Montoya, G. I. (2017). Propuesta para la Determinación del Sobreancho mínimo requerido para el vehículo C3S2 en el diseño de vías en Colombia. *Proyecto de Grado, I*, 100p. Bogotá: Escuela de Ingenieros Militares.
- Danilović, M., & STOJNIĆ, D. (2015). The State of Forest Roads in Serbia. Lviv, Ukraine: University of Belgrade.
- Donnell, ET, Adolini, M., Torbic, D., Mason, J., & Elefteriadou, L. (2001). *Truck Safety Considerations for Geometric Design and Traffic Operations*. Recuperado el 01 de julio de 2018, de http://nacto.org/docs/usdg/truck_safety_considerations_for_geometric_design_and_traffic_operations_donnell.pdf
- Giunta, J. A. (2014). Sobreancho en Curvas. *PRE-XVII Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito*, (pág. 37). Buenos Aires. Obtenido de <http://www.congresodevialidad.org.ar/congreso2014/conferencias/6-Giunta-Temas-Diseno-Geometrico.pdf>
- Grisales, J. C. (2002). *Diseño Geométrico de Carreteras* (Primera ed.). Bogotá: Eco Ediciones. Obtenido de <http://www.yobiplus.com/fondoadaptacion/archivos/CORDOBA/suelos%20c>

atolica/geologia%20y%20suelos/DISEÑO_GEOMETRICO_DE_CARRETERAS.pdf

Higuera, G. J. (2017). Determinación del sobreancho requerido para vías con bajas velocidades. Bogotá DC: Universidad Santo Tomas.

Ministerio de Transporte. (1998). Manual de Diseño Geometrico. 162. Colombia: Instituto Nacional de Vías.

Ministerio de transporte. (28 de 12 de 2004). Resolución 4100 de 2004. Colombia: MINTRANSPORTE.

Ministerio de Transporte. (2008). Manual de Diseño Geometrico INVIAS. 276. Colombia: Instituto Nacional de Vías.

Ministerio de Transporte y Comunicaciones. (2008). Manual para el diseño de carreteras pavimentadas de bajo volumen de tránsito. 171. Perú: Viceministerio de Transporte. Dirección General de Caminos y Ferrocarriles.

Ministerio de Transporte y Comunicaciones. (2013). Manual de Diseño Geométrico de Carreteras. 327. Perú: Viceministerio de Transporte. Dirección General de Caminos y Ferrocarriles.

Navarro Hudiel, S. (2011). *Diseño y cálculo geométrico de viales - Alineamiento Horizontal*. Estelí, Nicaragua: Universidad Nacional de Ingeniería .

Ortíz, L. M., & Díaz, O. B. (2009). Diseño Geometrico de Vías Mediado por TIC (Tecnologías de la información y la Comunicación). 23. Bucaramanga, PERÚ: Universidad Industrial de Santander.

Poe, C. (8 de Febrero de 2010). *Guide for Geometric Design and Operational Factors That Impact Truck Use of Toll Roads*. Recuperado el 03 de Agosto de 2018, de <http://ibttta.org/sites/default/files/Guide%20for%20Geometric%20Design%20and%20Operational%20Factors%20that%20impact%20Truck%20use%20of%20Tol%20l%20Roads%20TTI.pdf>

16. ANEXOS

Anexo 1 Modelaciones vehículo INVIAS

Anexo 1. Modelaciones vehículo INVIAS.

Archivo WinRAR



Tamaño:

233 MB

Anexo 2 Cálculos por tipo de curva.

Anexo 2. Cálculos por tipo de curva

Archivo WinRAR



Tamaño:

471 KB

Anexo 3 Levantamiento topográfico curvas.

Anexo 3. Levantamiento topográfico curvas

Archivo WinRAR



Tamaño:

686 KB

Anexo 4 Registro Fotográfico prueba pruebas piloto.

Anexo 4. Registro fotográfico prueba en campo

Documento PDF



Tamaño:

1,78 MB

Anexo 5 Modelaciones vehículo C3S2 pruebas piloto.

Anexo 5. Modelaciones vehículo C3S2 campo

Archivo WinRAR



Tamaño:

6,17 MB

Anexo 6 Herramienta Académica

Anexo 6. Herramienta Académica

Archivo WinRAR ZIP



Fecha de modificación: 1/02/2020 10:24 a. m.

Tamaño: 4,64 MB