

EFFECTO DE LA CANTIDAD DE CARGA
EN EL CONSUMO DE COMBUSTIBLE EN CAMIONES

JOHN JAIRO POSADA HENAO

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA - SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS
DOCTORADO EN INGENIERÍA
MEDELLÍN
2012

EFFECTO DE LA CANTIDAD DE CARGA
EN EL CONSUMO DE COMBUSTIBLE EN CAMIONES

JOHN JAIRO POSADA HENAO

Tesis

Director, Iván Reinaldo Sarmiento Ordosgoitia, Ph.D.
Codirector, Alexander Alberto Correa Espinal, Ph.D.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA - SEDE MEDELLÍN
FACULTAD DE MINAS
DOCTORADO EN INGENIERÍA
MEDELLÍN
2012

A Dios

A la Familia

Siempre han sido soporte y sin quienes no hubiera sido posible todo lo logrado en la vida.

A mis Amigos, por su compañía.

A todos aquellos que me preguntaban ¿Cómo va el doctorado, la tesis?, a lo que siempre respondí: ¿Qué es eso?

A todos los que creyeron, a los que dudaron, a los que pensaron que este trabajo era una locura.

A la paciencia, la terquedad y el ánimo ante las adversidades.

A la Universidad por las oportunidades.

A todos aquellos para los que este trabajo es útil.

John Jairo

Agradecimiento

Son muchos a quienes profeso gratitud por su apoyo, colaboración, ayuda, aprecio, y tantas otras cosas que me han brindado y que han permitido la realización de esta investigación.

A Dios por la voluntad y paciencia que me prodigó en varios momentos, las capacidades con las que cuento y me permiten seguir adelante.

A mi muy querida y directa familia: Jairo y Rosalía, mis padres; Magnolia, mi esposa con quien deseo seguir el camino de la vida; Isabela y Samuel, mis hijos; Luis Javier, Mónica Patricia y David, mis hermanos; Lina y Claudia, mis cuñadas; Alejandro, Sofía y Manuela, mis sobrinos; los abuelos Andrés, Gertrudis, Luis y Carmen a quienes recuerdo con mucho cariño.

A Jaider y Sandra, mis amigos, compañeros de viaje en esta vida y con quienes mucho se ha compartido y espero que así siga siendo.

A los tíos, primos, suegros y cuñados.

A los compañeros de trabajo.

A la Universidad Nacional de Colombia, en particular a la Facultad de Minas y su Departamento de Ingeniería Civil, por la oportunidad brindada.

A Jairo H. García Ospina, gerente de servicio en Cummins de Los Andes, de la organización Equitel.

A LAP International, de la organización Equitel.

A la Secretaría de Obras Públicas del Municipio de Medellín, en ella a los Ingenieros Alejandro Arcila y Luz Marina Aranzazu.

A los transportadores Álvaro Morales y Mario Zapata, y sus conductores Álvaro Monsalve y Hugo Molina.

A todos los que, involuntariamente, no menciono pero que han estado ahí pendientes.

Y, por supuesto, a los profesores Iván R. Sarmiento O. PhD y Alexánder A. Correa E. PhD, especialmente por su guía en la elaboración de la investigación, la revisión y comentarios al informe.

A los jurados por su evaluación y sugerencias para futuras investigaciones.

Todos han ayudado, además, a mi formación personal, profesional y académica.

John Jairo

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	16
1. JUSTIFICACIÓN Y APOORTE ESPERADO	18
1.1 JUSTIFICACIÓN	18
1.2 APOORTE ESPERADO	21
2. OBJETIVOS Y ALCANCE	23
2.1 OBJETIVO GENERAL	23
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	23
2.3 ALCANCE	23
3. CONSUMO DE COMBUSTIBLE	24
3.1 MARCO TEÓRICO	24
3.2 MODELOS PARA ESTIMAR EL CONSUMO DE COMBUSTIBLE	25
4. METODOLOGÍA INVESTIGATIVA	36
4.1 METODOLOGÍA GENERAL	36
4.2 METODOLOGÍA DETALLADA	36
4.2.1 Revisión bibliográfica	36
4.2.2 Parte experimental	37
4.2.3 Factorial para la investigación	39
4.2.4 Cantidad de datos	41

4.2.5	Procesamiento y análisis de información	42
5.	DISEÑO DEL EXPERIMENTO, OBTENCIÓN DE DATOS Y PROCESAMIENTO	43
5.1	DISEÑO DEL EXPERIMENTO	43
5.2	EJECUCIÓN DE PRUEBAS	60
5.3	PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN	62
6.	DATOS OBTENIDOS Y ANÁLISIS	64
6.1	DATOS OBTENIDOS	64
6.2	ANÁLISIS DE DATOS	67
6.2.1	Camión C3S3 - Factorial 3^k	68
6.2.2	Camión C3S3 - Factorial 2^k	73
6.2.3	Camión C3 - Factorial 3^k	77
6.2.4	Camión C3 - Factorial 2^k	82
6.3	ANÁLISIS DE MODELOS DE CONSUMO DE COMBUSTIBLE ENCONTRADOS	87
6.3.1	Resumen de modelos encontrados	87
6.3.2	Análisis para camión C3S3	87
6.3.3	Análisis para camión C3	91
6.4	COMPARACIÓN CON RESULTADOS DEL MODELO HDM-4	96
7.	CONCLUSIONES	101
8.	RECOMENDACIONES	104
9.	TRABAJOS FUTUROS	106
	BIBLIOGRAFÍA	107

BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA	113
ANEXOS	115

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Estructura de costos operativos para camiones - junio de 2011 -	24
Tabla 2. Factorial del experimento - Factores y niveles propuestos	40
Tabla 3. Factores y niveles propuestos – Factorial para camión y pendiente	41
Tabla 4. Distribución de camiones en Colombia - año 2006	45
Tabla 5. Distribución de camiones y carga transportada en Colombia – Encuesta de carga 2004	46
Tabla 6. Distribución de camiones en Colombia - año 2009	47
Tabla 7. Características básicas de los camiones utilizados en las pruebas	48
Tabla 8. Tránsito Promedio Diario (TPD) y composición para el sector vial. Año 2008	52
Tabla 9. Factores y niveles en la investigación – Factorial de experimento	54
Tabla 10. Factores, niveles y valores de niveles - Camión C3S3	55
Tabla 11. Factores, niveles y valores de niveles - Camión C3	55
Tabla 12. Datos de tramos para mediciones	55
Tabla 13. Diseño factorial 3^K para camión C3S3	58
Tabla 14. Diseño factorial 2^K para camión C3S3	58
Tabla 15. Diseño factorial 3^K para camión C3	59
Tabla 16. Diseño factorial 2^K para camión C3	59
Tabla 17. Datos obtenidos en pruebas de campo – Factorial 3^K – Camión C3S3	65
Tabla 18. Datos obtenidos en pruebas de campo – Factorial 3^K – Camión C3	66
Tabla 19. Datos obtenidos en pruebas de campo – Factorial 2^K – Camión C3S3	67
Tabla 20. Datos obtenidos en pruebas de campo – Factorial 2^K – Camión C3	67
Tabla 21. Resultados ANOVA – Factorial 3^K – Camión C3S3	69

Tabla 22. Resultados ANOVA – Factorial 2 ^K – Camión C3S3	74
Tabla 23. Resultados ANOVA – Factorial 3 ^K – Camión C3	78
Tabla 24. Resultados ANOVA – Factorial 2 ^K – Camión C3	83
Tabla 25. Modelos de consumo de combustible encontrados	87
Tabla 26. Comparación relativa de consumo según peso – Camión C3S3 – Factorial 3 ^K	89
Tabla 27. Consumo de combustible por cantidad de carga – Camión C3S3 – Factorial 3 ^K	89
Tabla 28. Consumo de combustible por cantidad de carga – Camión C3S3 – Factorial 2 ^K	91
Tabla 29. Comparación relativa de consumo según peso – Camión C3 – Factorial 3 ^K	92
Tabla 30. Consumo de combustible por cantidad de carga – Camión C3 – Factorial 3 ^K	93
Tabla 31. Consumo de combustible por cantidad de carga – Camión C3 – Factorial 2 ^K	94
Tabla 32. Comparación de consumo entre camiones C3S3 y C3	95
Tabla 33. Comparación consumo de combustible con HDM-4 – Camión C3S3	97
Tabla 34. Comparación consumo de combustible con HDM-4 – Camión C3	98
Tabla 35. Corrección para consumo de combustible usando HDM-4 – Camión C3S3	99
Tabla 36. Corrección para consumo de combustible usando HDM-4 Camión C3	99

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Consumo combustible vs. Velocidad camión en varios estudios	26
Figura 2. Comparación VOC observados y pronosticados con HDM no calibrado, para camiones en Canadá	30
Figura 3. Velocidad vehículo vs. Consumo de combustible (L/100km)	31
Figura 4. Velocidad vehículo vs. Consumo combustible – Camión Rígido	31
Figura 5. Velocidad vehículo vs. Consumo combustible – Camión Articulado	32
Figura 6. Proceso para la realización de pruebas de campo	39
Figura 7. Fotografía del equipo FM3306 de Mix Telematics	44
Figura 8. Fotografía del equipo FM3306 armado y con el datalink	44
Figura 9. Distribución de camiones en Colombia - año 2006	45
Figura 10. Distribución de camiones y carga transportada en Colombia – Encuesta de carga 2004	46
Figura 11. Distribución de camiones en Colombia - años 2006 y 2009	47
Figura 12. Fotografías - Camiones utilizados	48
Figura 13. Fotografías - Maniobras de cargue	49
Figura 14. Fotografías - Plataforma de pesaje y pantalla indicadora de peso	50
Figura 15. Estación de pesaje en carretera Medellín-Guarne	50
Figura 16 Ubicación general de la carretera en la que se hacen pruebas de campo	51
Figura 17. Evolución histórica del TPD en el sector vial considerado	52
Figura 18. Fotografías de los tramos para mediciones	56
Figura 19. Fotografía de GPS y antena externos	60
Figura 20. Proceso para la realización de recorridos para cada peso P_i	61
Figura 21. Imagen de mapa y registro del GPS externo	62

Figura 22. Gráfica de puntos – Factorial 3^K – Camión C3S3	68
Figura 23. Residuos para consumo – Factorial 3^K – Camión C3S3	69
Figura 24. Efectos principales para consumo – Factorial 3^K – Camión C3S3	70
Figura 25. Interacción para consumo – Factorial 3^K – Camión C3S3	70
Figura 26. Probabilidad de residuos – Distribución normal - Factorial 3^K – Camión C3S3	71
Figura 27. Gráfica de contorno – Factorial 3^K – Camión C3S3	72
Figura 28. Superficie de respuesta – Factorial 3^K – Camión C3S3	72
Figura 29. Gráfica de puntos – Factorial 2^K – Camión C3S3	73
Figura 30. Residuos para consumo – Factorial 2^K – Camión C3S3	74
Figura 31. Efectos principales para consumo – Factorial 2^K – Camión C3S3	75
Figura 32. Interacción para consumo – Factorial 2^K – Camión C3S3	75
Figura 33. Probabilidad de residuos – Distribución normal - Factorial 2^K – Camión C3S3	76
Figura 34. Gráfica de contorno – Factorial 2^K – Camión C3S3	76
Figura 35. Superficie de respuesta – Factorial 2^K – Camión C3S3	77
Figura 36. Gráfica de puntos – Factorial 3^K – Camión C3	78
Figura 37. Residuos para consumo – Factorial 3^K – Camión C3	79
Figura 38. Efectos principales para consumo – Factorial 3^K – Camión C3	79
Figura 39. Interacción para consumo – Factorial 3^K – Camión C3	80
Figura 40. Probabilidad de residuos – Distribución normal - Factorial 3^K – Camión C3	80
Figura 41. Gráfica de contorno – Factorial 3^K – Camión C3	81
Figura 42. Superficie de respuesta – Factorial 3^K – Camión C3	81
Figura 43. Gráfica de puntos – Factorial 2^K – Camión C3	82
Figura 44. Residuos para consumo – Factorial 2^K – Camión C3	83

Figura 45. Efectos principales para consumo – Factorial 2^k – Camión C3	84
Figura 46. Interacción para consumo – Factorial 2^k – Camión C3	84
Figura 47. Probabilidad de residuos – Distribución normal - Factorial 2^k – Camión C3	85
Figura 48. Gráfica de contorno – Factorial 2^k – Camión C3S3	85
Figura 49. Superficie de respuesta – Factorial 2^k – Camión C3S3	86
Figura 50. Efecto de la pendiente – Camión C3S3 – Factorial 3^k	88
Figura 51. Efecto del peso del vehículo – Camión C3S3 – Factorial 3^k	88
Figura 52. Efecto de la pendiente – Camión C3S3 – Factorial 2^k	90
Figura 53. Efecto del peso del vehículo – Camión C3S3 – Factorial 2^k	90
Figura 54. Efecto de la pendiente – Camión C3 – Factorial 3^k	91
Figura 55. Efecto del peso del vehículo – Camión C3 – Factorial 3^k	92
Figura 56. Efecto de la pendiente – Camión C3 – Factorial 2^k	93
Figura 57. Efecto del peso del vehículo – Camión C3 – Factorial 2^k	94
Figura 58. Consumo de combustible – Camión C3S3 – Modelo propio vs. HDM-4	97
Figura 59. Consumo de combustible – Camión C3 – Modelo propio vs. HDM-4	98

LISTA DE ANEXOS

	pág.
ANEXO A. Descripción del modelo de consumo de combustible del HDM-4	115
ANEXO B. Especificaciones del equipo referencia FM3306, marca Mix Telematics	134
ANEXO C. Información técnica de los camiones utilizados	139
ANEXO D. Soporte de revisión técnica a los camiones	142

RESUMEN

La tesis aborda el estudio del consumo o rendimiento de combustible en vehículos tipo camión operando en régimen de flujo libre, que es el que se encuentra típicamente en las carreteras en ambiente rural. Sobre este tema se han hecho estudios en diferentes lugares del mundo con los que se han obtenido modelos para predecir del consumo de combustible bajo ciertas condiciones de operación considerando principalmente aspectos relativos a la geometría de la carretera, pavimento, tráfico, y el mismo tipo de vehículo.

Cuando se considera un proyecto de carretera, en el análisis de los costos en el ciclo de vida tienen una importancia significativa los costos de operación vehicular, siendo el consumo de combustible el mayor componente dentro de estos, que es influenciado por diferentes aspectos como ya se mencionó.

La velocidad del vehículo y la pendiente de la carretera son elementos que afectan el consumo de combustible para cualquier vehículo, y son fundamentales para determinar su costo de operación; estos dos componentes están vinculados entre sí, y a su vez con la cantidad de carga, especialmente para los camiones, que les limita la velocidad para ciertas pendientes por la exigencia de potencia que se genera. Esto es de especial atención en carreteras con pendientes longitudinales medias y altas ya que provocan aumento en el consumo de combustible.

La ausencia de información de consumo de combustible y la inexistencia de vehículos prototipo representativos con información real de este consumo para varios países, incluido Colombia, y que los estudios hasta ahora realizados en otras partes del mundo, según lo consultado, presentan algunos vacíos, se considera válida la realización de esta investigación que se orienta a identificar principalmente el efecto de la cantidad de carga, en general del peso total del vehículo, en el consumo de combustible para camión circulando en régimen de flujo libre.

El desarrollo de la investigación contempla estudio de bibliografía relacionada con el tema, realización de pruebas que permitan identificar el efecto del peso total del vehículo en el consumo de combustible haciendo uso de la técnica del diseño de experimentos con aplicación de diseños factoriales, y finalmente encontrar modelos para estimar el consumo de combustible de camiones en varias condiciones de uso y proponer factores de ajuste a modelo preexistente de amplio uso internacional en la evaluación de proyectos viales.

Los principales hallazgos, que son aporte importante al conocimiento, permiten concluir que para el consumo de combustible: son el peso del vehículo y la pendiente de la carretera factores con mayor influencia en comparación con la velocidad que es el factor tradicional considerado; que no son adecuadas pendientes mayores al 5% para corredores de transporte de carga; y que el modelo existente de amplio uso internacional lo sobrevalora de manera importante. Se desarrollan modelos de consumo de combustible para dos tipos de camión siendo uno de ellos de amplio uso a nivel internacional y sobre el que no existe evidencia de investigaciones como lo realizada.

Palabras clave: consumo de combustible, carga, peso de vehículo, camión, diseño de experimentos, diseño factorial

ABSTRACT

This thesis is about the consumption or fuel performance in trucks that operate in free flow speed scheme which is usual on rural roads. There have been numerous studies around the world about this subject in which different models have been proposed under conditions such as road geometry and surface, traffic conditions and type of vehicle.

The cost analysis needs to be performed when road projects are considered; being the vehicle operating costs a key component of this analysis. The fuel consumption plays a major role in these costs and it is influenced by different aspects such as road geometry, surface, speed, slope, etc.

Vehicle speed and road slope are elements which affect any vehicle's fuel consumption and are important to determine their performance costs. These two components (speed and slope) are intrinsically joined with the load quantity. All the factors together, will limit truck's speed and performance in a high slope due to the generated power that it is required. A great deal of attention is needed to mid/high longitudinal slopes as they generate higher fuel consumption.

Due to the lack of information about fuel consumption in some countries, including Colombia, and the non-existent vehicle prototypes to retrieve real data from fuel consumption, it is vital to initiate this investigation with the purpose of identifying the effect of load quantity, vehicle's weight, slope, and speed in fuel consumption.

The development of this investigation contains a literature review and real tests that allow us to identify the effect of the vehicle's total weight in fuel consumption using factorial design of experiments. Also, models to predict/estimate truck's fuel consumption in different conditions were developed for two types of trucks; one of them is widely used at an international level but there isn't evidence of research on it. Finally, there were proposed factors of adjustment to an international existing model, widely used, in the evaluation of road projects.

The main findings of this research are of great value to the state of art in the vehicle's fuel consumption area and allow us to conclude that the vehicle's weight and the road's slope are the factors with major influence in the consumption instead of vehicle speed, which is the commonly used factor. It was also found that road's slopes greater than 5% are not recommended for trucks routes, and that the international model widely used to predict fuel consumption overestimates this consumption considerably.

Key words: fuel consumption, load, vehicle's weight, truck, experiment design, factorial design

INTRODUCCIÓN

Es reconocido que el servicio de transporte de carga por carretera es un factor determinante para la competitividad del país, no sólo por su incidencia dentro de los costos de las mercancías, sino por ser la principal alternativa para su movilización (CONPES, 2007), que se da en la mayoría de países del mundo.

Esta tesis versa sobre el consumo de combustible en vehículos, específicamente en camiones cuya fuente de energía para la locomoción es el “diesel” o ACPM -Aceite Combustible Para Motores- que es un producto de origen fósil y no renovable.

La importancia de esta investigación se da por la relevancia que tiene el combustible en la canasta de costos del transporte y por ende es de interés conocer en forma acertada el consumo que tienen los vehículos y el comportamiento ante diferentes condiciones de operación, y de la geometría de la carretera por donde circula; ya que de esta manera se puede controlar y predecir dicho consumo según las características enunciadas. Se estudia en particular el vehículo tipo camión ya que son los vehículos que mayor cantidad de combustible consumen, su operación se ve seriamente afectada por el entorno en el que se utilice, y además son de mayor impacto en la economía ya que movilizan carga para toda la sociedad, siendo un eslabón importante e imprescindible en el desarrollo económico y social. Conocer el consumo de combustible y su comportamiento, conjugado con considerar vehículos tipo camión realza la validez de esta investigación ya que los resultados obtenidos permiten controlar y establecer la forma de operación de los camiones y las relaciones económicas entre los agentes que participan en el transporte de carga; además para realizar la evaluación de proyectos viales con mayor certeza en las variables que lo componen, entre las cuales destaca el consumo de combustible.

El consumo de combustible se ha estudiado desde la aparición de los vehículos automotores, pero en épocas recientes es creciente el interés por este tema en busca de elementos que permitan optimizarlo debido a los costos que tiene el combustible, el impacto económico y ambiental que genera su uso, y el hecho de obtenerse de un recurso no renovable. Así, en los últimos años se han desarrollado investigaciones en este sentido pretendiendo aumentar el conocimiento sobre este tema de interés general, algunos de los estudios han derivado en la creación de modelos para su estimación.

Se ha podido identificar que en las investigaciones hechas no han sido consideradas algunas condiciones en las cuales son utilizados los camiones; y es precisamente esta investigación la que aborda algunos de estos vacíos como son: en forma cuantitativa la cantidad de carga que transporta el camión o más ampliamente el peso total del vehículo, y la pendiente de la carretera cuando adopta valores altos; estos dos aspectos son de gran importancia en el consumo de combustible, y además son condiciones muy normales en el transporte de carga pues los camiones no siempre son utilizados con la misma cantidad de carga, o peso total, y muchas regiones de países tienen carreteras con pendiente longitudinal variable adoptando valores altos por las condiciones topográficas.

Esta investigación, por tanto, plantea como objetivo determinar el efecto de la cantidad de carga que moviliza un camión, o peso total del mismo, en el consumo de combustible cuando transita en régimen de flujo libre en diferentes pendientes longitudinales de

carretera; presentando importante avance en el conocimiento de este fenómeno para las condiciones planteadas que como se ha indicado no se han considerado en anteriores investigaciones.

El alcance de la investigación está limitado a dos (2) tipos de camión, rígido y articulado, siendo el segundo de estos un camión articulado con 6 líneas de rotación o ejes, del cual tampoco se tiene evidencia de que se hayan hecho estudios al respecto, situación que revela otro aspecto importante de la investigación que permite aportes adicionales al conocimiento sobre el tema.

El desarrollo de la investigación se hace en una región de Colombia donde es posible encontrar las condiciones necesarias de flujo libre, amplio rango de pendientes longitudinales de carretera en un tramo vial no muy extenso y cerca de lugares donde sea posible acceder a servicios que permitan controlar las condiciones de trabajo deseadas. Además la metodología de trabajo considera el diseño de experimentos como herramienta para lograr realizar las pruebas de tal manera que se logre la utilización racional de recursos manteniendo calidad de datos y resultados, en forma particular se hace uso de la técnica de los diseños factoriales 3^K y 2^K , de aceptación estadística.

Con la realización de la investigación se tienen varios logros como son la aplicación del diseño de experimentos con factoriales 2^K y 3^K a un proyecto aplicado de transporte, aporte al conocimiento porque para el consumo de combustible se consideran para las variables explicativas valores antes no considerados, y se incluye un tipo de vehículo para el que se ha identificado no se han hecho análisis de este tipo.

Los resultados obtenidos, debido al mejor entendimiento del fenómeno estudiado, tienen diversas aplicaciones entre las cuales se destacan elementos que ayudan a mejorar aspectos operativos de la flota vehicular de carga como son: control al consumo de combustible para vehículos en operación y programación de flota e incluso de vehículos en particular dentro de la flota; permitir la mejora de las condiciones para establecer las relaciones económicas entre los diferentes actores del transporte de carga como son gobierno, transportadores y generadores de la carga; y mejora en los procesos de evaluación de proyectos viales por la valoración realista del componente consumo de combustible dentro de los costos de operación vehicular que permiten identificar buena parte de los beneficios derivados de la inversión en proyectos viales.

Este documento presenta inicialmente en el capítulo 1 la justificación, aporte o contribuciones esperadas; en el capítulo 2 los objetivos y alcance de la investigación, posteriormente en el capítulo 3 se muestran el marco teórico y algunos modelos que en otras investigaciones se han encontrado haciendo una descripción del modelo que actualmente se considera más completo, posteriormente en el capítulo 4 se indica la metodología general que se debe aplicar para la investigación, mientras que el detalle y desarrollo de la misma se presentan en el capítulo 5. El capítulo 6 es donde se muestran los datos obtenidos en la realización de las pruebas de campo, su procesamiento, logro de resultados y análisis, y la obtención de modelos matemáticos para estimar el consumo de combustible de dos (2) tipos diferentes de camión. Se presentan por último las conclusiones en el capítulo 7, recomendaciones en el capítulo 8, y en el capítulo 9 propuestas para futuras investigaciones.

1. JUSTIFICACIÓN Y APOORTE ESPERADO

1.1 JUSTIFICACIÓN

El transporte es esencial en el desarrollo de una región, en particular el de carga lo es para la competitividad ya que incide de forma directa en el costo de los productos (CONPES, 2007); y como en la mayoría de los países es el transporte por carretera la principal alternativa o principal modo de transporte (Sarmiento y Franco, 2002).

Para el transporte por carretera, como en los demás modos de transporte, es fundamental conocer los costos en los que se incurre por la operación de los vehículos ya que son base para establecer las tarifas correspondientes de los servicios que se ofrezcan; en este sentido conocer en forma acertada el consumo de combustible es indispensable ya que puede llegar a representar hasta el 60% del costo total de operación de los camiones (Instituto Mexicano del Transporte, 2002a).

La predicción del consumo de combustible es difícil debido a la cantidad de parámetros que influyen en él (Vogetseder, 2008) y a los avances tecnológicos que se tienen en los vehículos y el mismo combustible tal como lo indica el “*Integrated Transport Economic Appraisal Division*” – ITEA – del Departamento de Transporte en Inglaterra (ITEA, 2007), sin embargo estos avances no conllevan a que la reducción del consumo de combustible sea la prevista, pues si bien se tienen combustibles más eficientes sucede que los vehículos también requieren de mayor potencia especialmente por el aumento en las comodidades que brindan (Bandivadekar, 2008), como el aire acondicionado y la capacidad de carga entre otros; la industria continúa buscando mejorar el desempeño o eficiencia de los combustibles y vehículos de tal manera que se logre la disminución del consumo de combustible en general, lo que conlleva a beneficios económicos y ambientales (Bandivadekar, 2008; Beláustegui, 2005) que están siendo exigidos por los entes gubernamentales de varios países (Colin, 2000) indicándose además que los usuarios están dispuestos a pagar un valor más alto por estas tecnologías sabiendo que recuperarán estos costos durante el tiempo de uso del vehículo (Bandivadekar, 2008). Lo anterior se verifica con el hecho de que las características del vehículo tienen importancia en el consumo de combustible (Biggs y Akcelik, 1987), como también el hecho de que el costo del combustible afecta la manera de conducir y esta a su vez genera alteraciones en el consumo del combustible (Graham y Glaister, 2002; Cummins, 2003).

El consumo de combustible es de importancia por su gran impacto en la canasta de costos del transporte por tener alta participación en los costos de operación vehicular (Chesher y Harrison, 1987; Altamira, 2003; Cañadas, 2007; Vera, 2007); así se pueden tener varias aplicaciones o usos derivados de un adecuado conocimiento del mismo, entre los cuales se pueden mencionar: la identificación de efectos económicos para los usuarios de una carretera y entonces servir para la evaluación de proyectos de inversión en este tipo de infraestructura, medir la eficiencia de un sistema o flota vehicular, definir la composición de una flota vehicular, establecer relaciones económicas transportador-gobierno-usuario, definir estrategias de mantenimiento a las carreteras, y posiblemente otras. Una muestra del impacto de estos precios se ha visto reflejada en varios movimientos de los gremios transportadores en Colombia, los últimos realizados desde

abril de 2009, los que durante varias semanas suspenden el servicio reclamando una reducción de este precio.

Se han hecho estudios e investigaciones, en diversos lugares del mundo, con base en los cuales se han desarrollado modelos que permiten predecir el consumo de combustible para diferentes tipos de vehículo y condiciones de uso u operación; los modelos más recientes, y de mayor confiabilidad, son de tipo mecanicista (determinan y modelan matemáticamente la física del fenómeno en estudio, se basan en datos reales y en las características de comportamiento de las variables que se consideran, a diferencia de los modelos estadísticos que sólo consideran datos reales) que pueden ser adaptados y calibrados para ser utilizados según condiciones diferentes a aquellas bajo las cuales fueron desarrollados (Altamira, 2003; Bandivadekar, 2008; *Environmental Protection Agency*, 2005; Giannelli, Nam y Arbor, 2004; UI-Islam et al, 2003; Greenwood, 2003), para lo cual se requiere la elaboración de algunas actividades que permitan definir los parámetros y coeficientes adecuados; incluso se han elaborado este tipo de trabajos para vehículos tipo maquinaria agrícola y de construcción de carreteras (Bohman, 2006).

Asumir valores por defecto en los modelos conlleva posiblemente a errores en las predicciones, y en el caso de la estimación del consumo de combustible se han obtenido diferencias hasta del 200% con respecto a valores reales, correspondiendo las mayores diferencias a los camiones en situación de congestión vehicular (Greenwood, Dunn y Raine, 2007), esto y otros aspectos, entre los que se destacan la desactualización, alcance, tecnología, comportamiento del conductor y políticas de transporte, hacen que los modelos de costos de operación vehicular deban ser calibrados (Chesher y Harrison, 1987; Altamira, 2003), y entre estos deben estar los de consumo de combustible.

Los costos de operación vehicular son importantes en la evaluación técnico – económica de proyectos viales para lo cual también se han desarrollado modelos que han surgido para hacer más ágil, eficiente y segura la distribución de los recursos en el sector vial, debido a la situación crítica que se origina a partir de que los fondos asignados a este sector son cada vez más escasos, los caminos se van envejeciendo, y el tránsito, tanto en flujo como en carga, que los solicita y deteriora, aumenta cada vez más. Estos modelos determinan la alternativa óptima de inversión, entre las diferentes políticas de diseño, construcción y mantenimiento de carreteras, utilizando el principio de minimización del costo total del transporte, concepto que ha tomado consenso creciente entre administradores, economistas e ingenieros en caminos, en los países desarrollados y los en vías de desarrollo (de Solminihac, 2001).

El modelo para la predicción del consumo de combustible de mayor aplicación a nivel internacional es el que está incluido en el HDM-4 (*Highway Development and Management*) debido a la amplia investigación que ha permitido su desarrollo; sus relaciones se han aplicado aproximadamente en 100 países (desarrollados y no) con marcadas diferencias tecnológicas, climáticas y económicas (ISOHDM, 2000c). La aplicación de este modelo conlleva dos (2) importantes pasos: la entrada de datos y la calibración de los datos de salida (ISOHDM, 2000c).

Puesto que el modelo permite simular cambios futuros en el sistema de carreteras a partir de condiciones actuales, la confiabilidad de los resultados depende de dos consideraciones primarias (ISOHDM, 2000c):

- La fiabilidad de la representación de las condiciones actuales y los factores que las influyen en los datos provistos del modelo, y
- La veracidad de las predicciones de los comportamientos y las interacciones entre los diferentes factores de la variedad de condiciones del modelo.

En particular para el modelo de consumo de combustible del HDM-4 se tiene que varios de los estudios que lo fundamentan se realizaron con vehículos de la década de 1980 (Altamira, 2003 citando a Biggs, 1988) por lo que se resta actualidad y precisión al modelo (Altamira, 2003), debido a que se han desarrollado avances en la tecnología de los vehículos durante el período transcurrido hasta el presente desde que los estudios se realizaron. Además muchos de los estudios se han hecho con vehículos nuevos del momento (Chesher y Harrison, 1987) situación que influye en el consumo de combustible y en general en el rendimiento del vehículo hasta que todas las piezas se acoplen y el funcionamiento del vehículo se estabilice.

Lo anterior plantea entonces la necesidad de hacer la adaptación y calibración del modelo a las condiciones del sitio de aplicación, en esto se fundamenta la propuesta de adaptar y calibrar el modelo de consumo de combustible para Colombia debido a que no se han realizado trabajos de este tipo en nuestro país (Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 2003), esto se estima de alta conveniencia para poder conocer con mayor precisión el efecto de las intervenciones en las carreteras, y así mismo el de no hacer tales intervenciones. Además el modelo a considerar, que es el del HDM-4 no contó con información de los vehículos C3S3 (ISOHDM, 2000b) que hacen parte importante de la flota vehicular actual para el transporte de carga, una realidad de la que no es diferente la situación en Colombia.

De otro lado la cantidad de carga que transporta un vehículo es importante dado que influye en el consumo de combustible, en Colombia como en la mayoría de países del mundo se ha encontrado que en carretera cerca del 30% de los camiones transita vacío (Holguín–Veras y Thorson, 2003; Mesa, 2008) llegando a ser incluso del 40% según Holguín–Veras y Patil (2005), y en zonas urbanas son cerca del 20% (Holguín –Veras et al, 2011), pero también algunos circulan con sobrecarga tal como se identificó en el período 1995-2001 en el que se encontró que el sobrepeso promedio en los camiones fue del 13% siendo estos camiones el 12% de la flota total de camiones que fue sometida a control de peso en este período; luego del 2001 el sobrepeso disminuyó pero se supone que fue porque el Gobierno permitió aumento de la magnitud de las cargas legales en los camiones (Sánchez, 2003); de otro lado se conoce que para el período 1997-2004, los vehículos de carga presentaron una utilización promedio del 50% de la capacidad en peso y del 74% de la capacidad en volumen (CONPES, 2007), se identifica entonces que el parque automotor de carga en Colombia presenta una relativa baja utilización en general, que puede presentarse como un indicio de un desbalance entre la oferta de transporte y la demanda de servicios de movilización, esto indudablemente tiene consecuencias económicas para los transportadores y para quienes solicitan del servicio. Sin embargo la sobre oferta debe ser analizada por tipología de camión y de producto transportado, ya que hay productos como los combustibles, leche, refrigerados y carbón que requieren de un transporte especial, cuyos viajes de retorno en vacío son cercanos al 100% aumentando así el promedio de viajes vacíos a nivel nacional; de otro lado los viajes vacíos son normales en el transporte de carga y se deben entre otros a la asimetría de la

demanda de carga entre orígenes y destinos, el caso importación/exportación, condición de transporte para algunos productos sin carga de retorno, y los períodos de producción.

Las consecuencias de esta situación no están determinadas pero si es visible que tiene efectos sobre los costos de operación vehicular y por consiguiente en las tarifas de transporte. Por esto es que posiblemente y con el objetivo de obtener una efectiva reducción de costos en el servicio de transporte, la estructura organizacional del transporte de carga debe fomentar prácticas comerciales que permitan relaciones estables con los generadores de la carga, aprovechando posibles economías de escala, y desde el punto de vista operativo, la adopción de mejores prácticas de transporte y prestación de servicios de logística. En este aspecto, la Política nacional de transporte público automotor de carga en Colombia está orientada a promover la organización de la cadena productiva del sector transporte terrestre automotor de carga, de tal manera que se asegure el desarrollo sostenible del mismo, bajo esquemas de libre competencia, transparencia, facilitación logística, eficiencia y profesionalización (CONPES, 2007).

Un sector que recibe directamente el impacto inicial del alza de precios de los combustibles es el del transporte, desde donde se transmite a otros sectores de la economía como efecto secundario a través de la elevación de los precios de los productos de la canasta familiar y bienes de consumo en general. Los efectos macroeconómicos del alza de precios de la energía, como el aumento de la inflación y la disminución del ritmo de crecimiento, afectan asimétricamente a los grupos sociales más vulnerables, lo cual plantea un reto adicional para las políticas sociales y de lucha contra la pobreza en los países (Sociedad Alemana de Cooperación Técnica, 2008). Esto pone en vigencia el hecho de poder identificar lo mejor posible el consumo de combustible en los vehículos, sobre todo en los camiones, ya que, como se ha citado, son parte importante de la canasta de costos del transporte llegando a ser incluso equivalente al 46% del costo total de operación para camiones (Cañadas, 2007), y por consiguiente un adecuado conocimiento del consumo se verá reflejado en una mejor definición de los costos totales del transporte.

Por otra parte se ha podido identificar, según la información consultada, que los modelos de consumo de combustible no han sido desarrollados considerando variabilidad en la cantidad de carga diferente a la de considerar, incluso en algunos casos de forma visual, la condición de vehículo vacío, medio cargado y totalmente cargado (Chesher y Harrison, 1987; Instituto Mexicano del Transporte, 2001, 2002a y 2002b), por esto es que se pretende estudiar este efecto de manera más profunda.

1.2 APORTE ESPERADO

Como resultado de esta investigación se espera aportar al conocimiento con las siguientes contribuciones:

- Caracterizar el consumo de combustible en camiones para algunas condiciones en donde no se han realizado estudios al respecto, como las que se tienen en algunas regiones de Colombia, relacionadas por ejemplo con altura por encima de los 1500m sobre el nivel del mar.

- Identificar la variación en el consumo de combustible para camiones por efecto de la cantidad de carga transportada, a partir de mediciones reales y sistemáticas.

Conocidos los resultados de esta investigación se podrá estimar el consumo de combustible de camiones validándose la aplicación de un modelo matemático; y evaluado las diferencias en este consumo debidas a la variabilidad de la cantidad de carga transportada, pudiéndose proponer de esta manera una mejora a nivel internacional. Los resultados obtenidos se considera serán válidos para regiones en donde los vehículos y las condiciones sean similares a las consideradas en la investigación.

Se espera encontrar que el peso del vehículo y la pendiente de la vía tienen una acción conjunta sobre el consumo de combustible; que esta acción puede ser cuantificada, que el peso del vehículo tiene diferente efecto según el tipo de camión y la pendiente de la carretera; y que la combinación carga - tipo de camión tiene un nivel de eficiencia óptimo diferente para cada tipo de camión.

2. OBJETIVOS Y ALCANCE

La investigación se orienta a determinar la variación del consumo de combustible que tiene un camión cuando transporta diferente cantidad de carga, circulando en régimen de flujo libre. Para esto se plantean los objetivos descritos en los siguientes numerales:

2.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar el efecto de la cantidad de carga que moviliza un camión, en el consumo de combustible cuando transita en régimen de flujo libre.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar las variables incidentes en el consumo de combustible de camiones,
- Identificar la incidencia de la cantidad de carga y la pendiente de la carretera en el consumo de combustible en camiones, y
- Proponer ajustes al modelo para la predicción del consumo de combustible que está inmerso en el HDM-4, según la cantidad de carga transportada.

2.3 ALCANCE

Para la identificación del efecto de la cantidad de carga transportada o peso total del vehículo sobre el consumo de combustible, el alcance del estudio se restringe a la consideración de dos (2) vehículos tipo camión circulando en carretera pavimentada con asfalto y con funcionamiento en régimen de flujo libre.

El trabajo investigativo en su integridad se realiza para condiciones típicas de alguna región de Colombia, para lo cual se identifica una carretera con características operacionales y funcionales que permitan la elaboración de las pruebas respectivas.

Se consideran varios aspectos como condiciones fijas del estudio entre los cuales están la calidad del combustible, conductor adecuado y único por tipo de camión, condición climática seca, y única altura sobre el nivel del mar; y se eligen camiones representativos del parque vehicular.

3. CONSUMO DE COMBUSTIBLE

3.1 MARCO TEÓRICO

Al considerar el ciclo de vida de una carretera, útil en la evaluación de proyectos viales, los costos de operación vehicular son el componente más significativo del costo total de transporte y del usuario (Greenwood y Bennett, 1995). El consumo de combustible representa uno de los insumos más importantes dentro del costo de operación de un vehículo, como por ejemplo 33% para vehículos livianos (Cañadas, 2007), y para cierto tipo de vehículos en algunos países puede representar hasta el 50% de los costos de transporte por unidad vehicular (Altamira, 2003; Chesher y Harrison, 1987), un rango entre 40% y 60% se ha encontrado en algunos estudios para los vehículos tipo camión (Instituto Mexicano del Transporte, 2002a), por ejemplo 46% según Cañadas (2007), y en otros se ha estimado en el 30% para el conjunto de vehículos en general (Vera, 2007), aunque esto depende de la región en la que se realicen las valoraciones debido por ejemplo a los costos laborales o costo del tiempo de los usuarios; además del propio costo del combustible ya que, en el año 2001, para Venezuela era el 4% de la estructura de costos, mientras que para España era el 29%, para Bolivia 28% y para Colombia 24% (Coca, Compés y Capuz, 2002).

Según la Federación Colombiana de Transportadores de Carga por Carretera –Colfecar -, para Colombia el combustible representaba en el año 2011 cerca del 33% del costo total de operación para vehículos tipo camión, como puede verse en la Tabla 1 (Colfecar, 2012) incluyendo en dicho costo los peajes. Si no se incluye el valor de los peajes, como es usual en las evaluaciones económicas ya que el peaje es una transferencia que se destina a financiar un bien o un activo como son las carreteras cuyo costo ya se incluye en la evaluación, el costo del combustible estaría cercano al 38% del costo económico de operación.

Tabla 1. Estructura de costos operativos para camiones - junio de 2011 -

Concepto	Participación (%)
Salarios, prestaciones y comisiones	10.54
Combustibles	33.60
Llantas y neumáticos	13.80
Filtros y lubricantes	2.93
Mantenimiento y reparación	12.22
Peajes	11.52
Impuesto al vehículo	0.20
Seguros	7.74
Retefuente	1.43
Garajes y lavado	2.14
Otros	3.87
Total	100.00

Fuente: Colfecar, 2012 y elaboración propia

3.2 MODELOS PARA ESTIMAR EL CONSUMO DE COMBUSTIBLE

Casi desde que fue inventado el vehículo se han realizado investigaciones conducentes a conocer el consumo de combustible necesario para la locomoción de los mismos. Más recientemente estos estudios se han orientado a conocer el efecto de aspectos como la velocidad, geometría vial, y el tipo y estado del pavimento, entre otros, sobre este consumo de combustible. Inicialmente los investigadores usaron gruesos datos empíricos que posteriormente han sido remplazados por resultados de estudios experimentales, en los cuales se ha relacionado el consumo de combustible con las condiciones específicas de operación, y la modelación usando una aproximación empírica. Más recientemente se ha modelado el consumo de combustible usando principios mecanicistas que lo relacionan con las fuerzas de oposición al movimiento (Greenwood y Bennett, 1995).

Para calcular el consumo de combustible se recurre a dos (2) tipos de modelos, los de estimación estadística y los mecanicistas, los primeros son muy económicos y sencillos de construir mientras que en los segundos la principal desventaja es que se requiere una gran cantidad de recursos para su desarrollo y formulación. Sin embargo la tendencia de los modelos es que sean de tipo mecanicista y se consideran parte integral de otros modelos cuyo objeto es servir de herramienta para la evaluación técnica y económica de proyectos viales (Altamira, 2003), así su uso es el más conveniente debido a su flexibilidad y a que una buena alternativa de utilización se deriva en que es posible calibrar sólo las variables que mayor incidencia tienen o que son necesarias de acuerdo a las condiciones de aplicación.

La alternativa de la calibración de un modelo mecanicista mediante la modificación de algunos de sus parámetros y la observación de algunas de las variables es una tarea conveniente en muchos casos, en lugar de pretender el desarrollo de un nuevo modelo (Altamira, 2003).

Los modelos disponibles son obtenidos con base en promedios de resultados obtenidos en estudios realizados en diversos lugares (ISOHDM, 2000c) y considerando vehículos nuevos (Chesher y Harrison, 1987) no correspondiendo esto a las condiciones propias de lugares específicos ni a que la flota vehicular tiene varios años de uso; con la elaboración del trabajo propuesto se pretenden identificar los valores adecuados de los coeficientes de las variables o parámetros que definen el consumo de combustible para algunas condiciones de operación propias de Colombia con lo que se podrá ampliar la válida aplicación de algún modelo a regiones con características similares a las consideradas, así como el efecto de la cantidad de carga con la que opera el camión, o el peso del mismo, que no ha sido convenientemente validada en los modelos conocidos hasta la realización de esta tesis.

Una primera aproximación a los modelos para costos de operación vehicular considera para cada componente, incluyendo al combustible, las características de la carretera con el análisis de datos por mínimos cuadrados teniendo presente un término de error, así (Chesher y Harrison, 1987):

$$c = x * f + e \tag{1}$$

Donde: c = costo o consumo del elemento
 x = vector de características de la carretera
 f = vector de coeficientes,
 e = error.

El error “ e ” no puede estar correlacionado con “ x ”, usualmente “ f ” se determina por mínimos cuadrados, y es posible en algunos casos que “ c ” sea remplazado por $\log(c)$ con el fin de facilitar la obtención de resultados de manera lineal, por lo que el modelo será semilogarítmico.

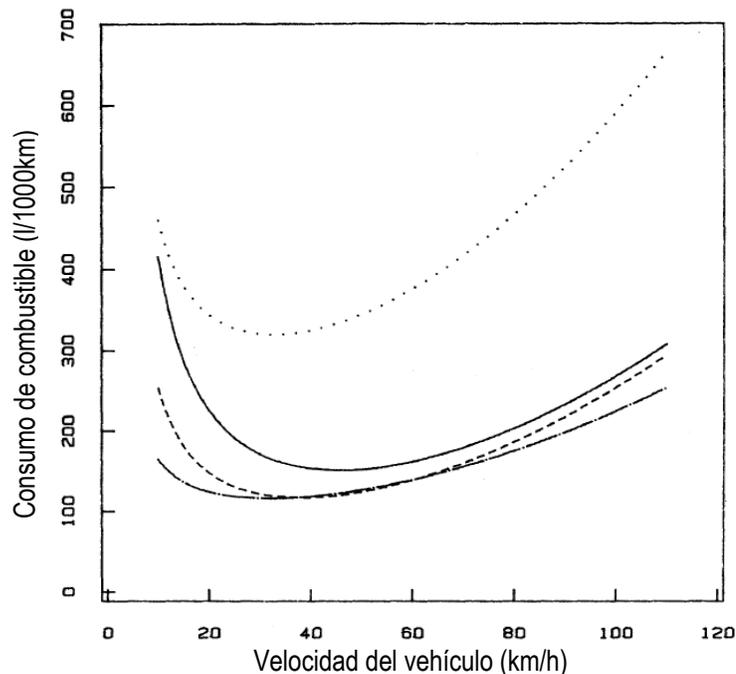
Otros estudios plantean que el consumo de combustible es función de la velocidad del vehículo y se establece la siguiente relación funcional (Chesher y Harrison, 1987):

$$F = a + b/V + c \cdot V^2 \quad (2)$$

Donde: F = consumo de combustible por unidad de distancia
 V = velocidad del vehículo

Por esta ecuación el consumo de combustible tiene comportamiento de curva en “U”, como se muestra en la Figura 1, en el que el mayor consumo de combustible se presenta a velocidades relativamente altas o bajas, y un valor mínimo cuando la velocidad del vehículo es igual a $(b/2c)^{1/3}$. El coeficiente “ a ” es función de características de la carretera y del vehículo en las cuales tienen participación el peso y la relación peso/potencia del vehículo (Chesher y Harrison, 1987).

Figura 1. Consumo combustible vs. Velocidad camión en varios estudios



Fuente: Chesher y Harrison, 1987 y Elaboración propia

Una expresión alterna, obtenida con pruebas de laboratorio, es (ITEA, 2007):

$$L = a + b*v + c*v^2 + d*v^3 \quad (3)$$

Donde: L = consumo en l/km

V = velocidad media en km/h

a, b, c y d son parámetros definidos para cada tipo de vehículo

Con esta expresión se obtiene un comportamiento del consumo de combustible similar al que se ilustra en la Figura 1, es decir en forma de “U”, este modelo no es muy válido debido a que sus resultados no se han validado con datos reales en campo.

Un avance en el desarrollo de estos modelos para la estimación del consumo de combustible se evidencia con la expresión siguiente (Greenwood y Bennett, 1995):

$$FC = a_0 + a_1/S + a_2*S^2 + a_3*RISE + a_4*FALL + a_5*IRI \quad (4)$$

Donde: FC = Consumo de combustible en l/1000km

S = velocidad del vehículo en km/h

IRI = índice de regularidad internacional en m/km

RISE = ascenso de la carretera en m/km

FALL = descenso de la carretera en m/km

a₀, a₁, a₂, a₃ y a₄ son constantes o coeficientes de las variables

Se observa la inclusión de la inclinación de la carretera considerando los ascensos y descensos, así como el estado de la carretera representado por el Índice de Regularidad Internacional – IRI -, comúnmente conocido como Rugosidad.

Nótese que no se evidencia todavía la consideración del peso del vehículo, o la carga movilizada, como factor para el cálculo del consumo de combustible, encontrándose entonces la viabilidad de desarrollar la investigación propuesta.

En un extenso estudio hecho en Brasil, que ha servido de base para el desarrollo de algunos modelos, la carga de los vehículos fue estimada, cuando era posible, de forma visual y los datos registrados en este aspecto fueron: vacío, medio lleno y cargado (Chesher y Harrison, 1987), las expresiones encontradas para determinar el consumo de combustible son diferentes para los casos de ascenso y descenso, así (Chesher y Harrison, 1987):

Con $HPI \geq 0$

$$UFC_i = a_0 + a_1*CRPM + a_2*CRPM^2 + a_3*HPI + a_4*HPI*CRPM + a_5*HPI^2 \quad (5)$$

Para $HPI < 0$

$$UFC_i = a_0 + a_1*CRPM + a_2*CRPM^2 + a_6*\max(NH_0, HPI) + a_7*\max(NH_0, HPI)^2 \quad (6)$$

Con $i = u$ (subida) ó d (bajada).

UFCi corresponde al consumo de combustible por unidad de tiempo (ml/s) y HPi a la potencia del vehículo expresada en HP (caballos de potencia).

Las expresiones para HPi son:

$$\text{Tramos de subida: } HP_u = [(1000 \cdot CR + RF) \cdot GVW \cdot g \cdot V_u + AIR \cdot V_u^3] / 736 \quad (7)$$

$$\text{Tramos de bajada: } HP_d = [(1000 \cdot CR - RF) \cdot GVW \cdot g \cdot V_d + AIR \cdot V_d^3] / 736 \quad (8)$$

Las variables en estas expresiones se definen así:

CRPM = velocidad promedio nominal del motor (rpm), constante por tipo de vehículo.

CR = coeficiente de resistencia a la rodadura (adimensional)

$$= 0,0218 + 0,0000467 \cdot QI \text{ Para vehículos livianos} \quad (9)$$

$$= 0,0139 + 0,0000198 / QI \text{ Para buses y camiones} \quad (10)$$

QI = Regularidad de superficie, en unidades QI; 1QI = 55BI_{mm/km} y BI = 630(IRI)^{1,12} (11)

RF = subidas + bajadas (m/km)

GVW = peso de la masa vehicular (toneladas)

g = constante gravitacional (9.81 m/s²)

Vd, Vu = velocidades en descenso (d) y ascenso (u) (m/s)

$$AIR = 0,5 \cdot \rho \cdot CD \cdot AR \quad (12)$$

Donde: ρ = densidad en masa del aire (kg/m³)

$$\rho = 1,225 \cdot (1 - 2,26 \cdot 10^{-5} \cdot A), A = \text{altitud (m)} \quad (13)$$

CD = coeficiente aerodinámico de dragado (adimensional)

AR = área frontal proyectada del vehículo (m²).

a₀ ... a₇, y NH₀ son coeficientes

El consumo de combustible en l/1000km está dado por:

$$F = 500 \cdot \alpha \cdot ((UFC_u / V_u) + (UFC_d / V_d)) \quad (14)$$

Donde: α = 1.16 para vehículos livianos y 1.15 para buses y camiones, es un factor de ajuste para considerar las condiciones normales de operación.

Otros estudios en Brasil reportan como resultado, para los buses (no se consideraron camiones), la siguiente expresión (Chesher y Harrison, 1987):

$$\log_e(F) = 5.618 + 0.000765 \cdot QI + 0.00036 \cdot C \quad (15)$$

Donde: F = Consumo de combustible (l/1000km)

QI = Regularidad de la superficie (en unidades QI)

C = curvatura media (°/km)

Otros modelos matemáticos se han hecho explícitos para vehículos pesados entre los cuales están los camiones, como los que se presentan a continuación (Cañadas, 2007):

- Pendiente ascendente o nula:

$$C_{cc} = 388.18 - 7.32 \cdot V_{cp} + 7 \cdot 10^{-2} \cdot V_{cp}^2 + 101.28 \cdot r + 1.99 \cdot 10^{-2} \cdot V_{cp} \cdot r + 7.85 \cdot 10^{-3} \cdot V_{cp}^2 \cdot r \quad (16)$$

- Pendiente descendente

$$C_{cc} = 213.31 - 6.15 \cdot V_{cp} + 7.42 \cdot 10^{-2} \cdot V_{cp}^2 + 6.08 \cdot p + 3.82 \cdot 10^{-2} \cdot V_{cp} \cdot p + 7.27 \cdot 10^{-4} \cdot V_{cp}^2 \cdot p \quad (17)$$

Donde: C_{cc} = Consumo de combustible (c.c./km).

V_{cp} = Velocidad de cálculo para vehículos tipo camión y otros pesados (km/h).

r = Pendiente en % (positivo o nulo).

p = Pendiente en % (negativo).

Un modelo de amplia aplicación, y tal vez el más importante a nivel internacional, es el que se encuentra en el HDM-4 - última versión del modelo HDM (Altamira, 2003; Greenwood, 2003; UI-Islam et al, 2003) desarrollado en sus inicios por el Banco Mundial y posteriormente mejorado y actualizado por la participación de otros organismos y entidades interesadas en el tema, según el *International Study of Highway Development and Management Tools* – ISOHDM (ISOHDM, 2000a). El modelo HDM es mundialmente usado como herramienta de planificación y programación de inversiones y políticas de mantenimiento en carreteras, es un modelo (con aplicativo informático) que simula las condiciones físicas y económicas a lo largo de un período de análisis, llamado ciclo de vida, de varias alternativas y situaciones especificadas por el usuario (ISOHDM, 2000a).

El modelo de consumo de combustible que se encuentra en el HDM-4 tiene un enfoque de tipo mecanicista que permite flexibilidad para modelar vehículos y características individuales de la carretera, y modificarlo cuando se introducen mejoras tecnológicas (ISOHDM, 2000b); esta condición lo hace apto para el trabajo de investigación propuesto.

En el caso del consumo de combustible, el modelo del HDM-4 presenta las mejores posibilidades de aplicación a distintos tipos de pavimento, ya que éste y otros como el *Pavement Evaluator* han mejorado los modelos de deterioro de pavimentos asfálticos e incorporado los de hormigón, lo que ha mejorado una gran deficiencia de otros anteriores. Además, con el HDM-4 los modelos de costos de operación han conseguido un gran avance en cuanto a la modelación y actualización de algunos de sus componentes. No obstante todavía hay aspectos que continúan relegados en su análisis (Altamira, 2003).

El modelo HDM permite hacer estimativos del estado de carretera, costos y comparaciones para evaluaciones técnicas y económicas para diferentes alternativas de construcción, mejora y conservación, incluyendo diferentes alternativas a lo largo del tiempo, para un proyecto de carretera específica o una red completa según sea requerido. El HDM pronostica los costos totales del proyecto para todas las alternativas de diseño y de conservación propuestas por el evaluador, año por año; descuenta los costos futuros en una escala prorrateada acorde con tasas de interés de descuento, para que el evaluador pueda elegir la alternativa que considere más conveniente según los criterios en consideración. Los costos se consideran en tres grupos que se interrelacionan de manera conjunta en el tiempo: Construcción, Conservación o Mantenimiento, y Uso de la carretera, estos costos se determinan prediciendo las cantidades físicas de consumo de cada recurso, para luego multiplicarlas por los costos o precios unitarios.

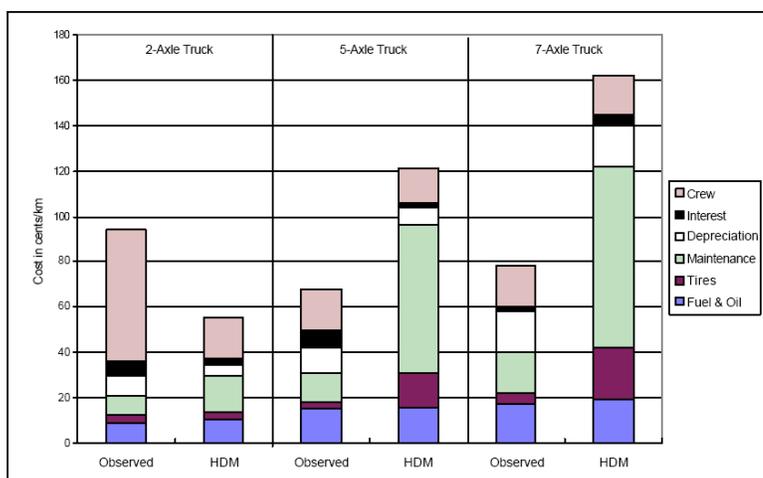
El concepto general de HDM consiste en que el usuario define una serie de alternativas que describen las diferentes opciones de inversión en construcción, mejora y conservación para la carretera. Las inversiones, reflejadas en las actividades a ejecutar en la carretera, influyen la condición del pavimento a lo largo del tiempo y así mismo

los costos futuros de la misma conservación. Las condiciones del pavimento y del tráfico tienen influencia sobre los efectos a los usuarios de la carretera (RUE–*Road User Effects*, por sus siglas en inglés). El modelo pronostica las velocidades del tráfico y los consumos de los componentes del RUE (combustible, neumáticos, etc.); multiplicando éstos por sus costos unitarios individualmente se obtiene el RUE a lo largo del tiempo. Comparando los costos de las diferentes alternativas de inversión se obtiene una evaluación de tipo económico, y se pueden identificar de manera directa las diferencias en los costos y así los beneficios de las diferentes alternativas, usando principios económicos.

Para realizar un trabajo integral, el HDM consta de una serie de submodelos que se ajustan a diferentes aspectos del análisis; cada uno de los submodelos requiere ciertos datos de entrada y produce sus propios resultados o datos de salida. Para aplicar el modelo correctamente, es necesario asegurarse que los datos de entrada sean apropiados y que los mismos han sido convenientemente calibrados (ISOHDM, 2000c).

La aplicación de cualquier modelo debe ser cuidadosa, como también la calibración local. Como ejemplo, para camiones en Canadá, se ilustran en la Figura 2 los costos de operación vehicular observados y los pronosticados con el modelo del HDM con valores predefinidos no ajustados (ISOHDM, 2000c). Se observan diferencias significativas para los casos del VOC total (*Vehicle Operation Costs* por sus siglas en inglés) y también en las contribuciones relativas de los diferentes componentes de tales costos, diferencias que surgen debido a que el HDM no esté debidamente calibrado. Una inadecuada aplicación o calibración local puede distorsionar estos costos y sus aplicaciones, por lo que se hace necesaria la calibración del modelo verificando los resultados obtenidos con el modelo y los que se tienen de observaciones en campo (Altamira et al, 2004).

Figura 2. Comparación VOC observados y pronosticados con HDM no Calibrado, para camiones en Canadá

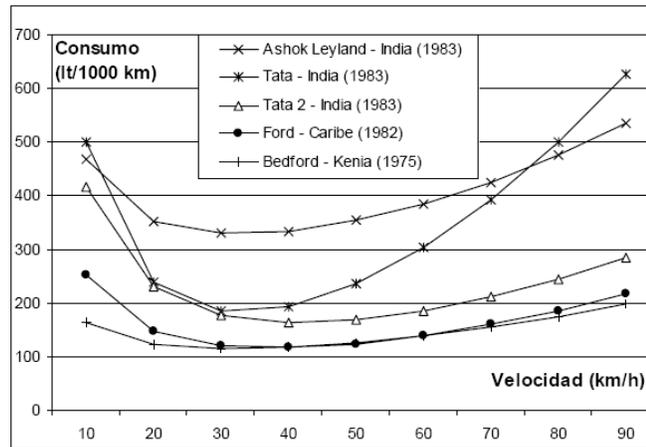


Fuente: ISOHDM, 2000c

Otra muestra de la necesidad de la calibración y adaptación de los modelos, y en particular del modelo de consumo de combustible, se puede identificar al observar la Figura 3 en la que se ilustra la relación entre consumo de combustible y velocidad de los

vehículos; se muestran en esta figura los resultados de estudios hechos en diversos lugares del mundo y en diferentes épocas. Las diferencias que se aprecian son llamativas pues no se conservan elementos de coincidencia numérica entre ellos; sólo coinciden, de alguna manera, la forma de las curvas indicando que el consumo de combustible es alto para velocidades bajas y altas, y que por consiguiente se tiene una velocidad intermedia que correspondería al valor óptimo en cuanto al menor consumo de combustible.

Figura 3. Velocidad vehículo vs. Consumo de combustible (L/100km)

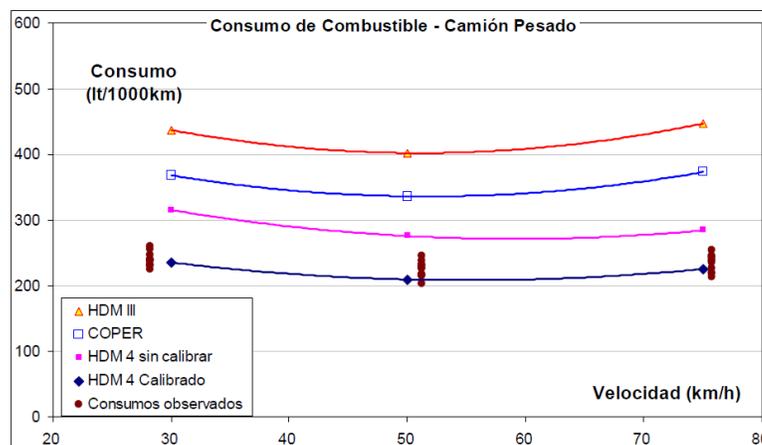


Fuente: Altamira, 2003

El comportamiento del consumo de combustible, que se ve en la Figura 3, corresponde con el modelo genérico que se mencionó anteriormente (ver Figura 1) en el que se tiene una curva en “U” en la cual el mayor consumo de combustible se presenta para velocidades relativamente altas o bajas (Chesher y Harrison, 1987).

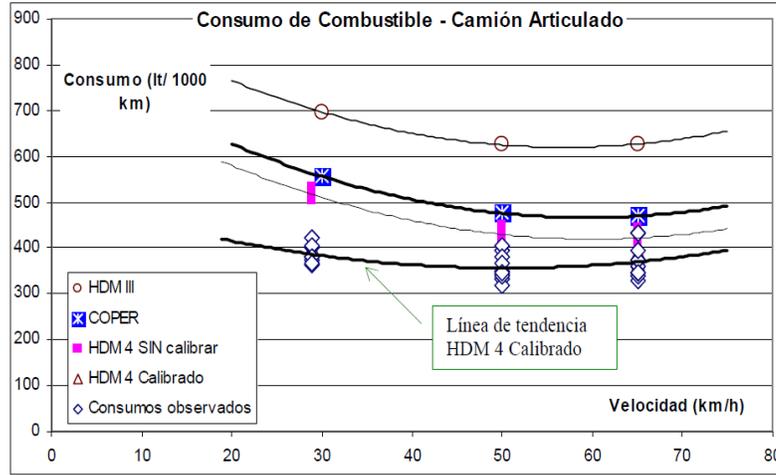
Resultados más recientes también se tienen en los que se evidencia la importancia de la calibración de los modelos, algunos resultados se presentan en las Figuras 4 y 5.

Figura 4. Velocidad vehículo vs. Consumo combustible – Camión Rígido



Fuente: Altamira, 2003

Figura 5. Velocidad vehículo vs. Consumo combustible – Camión Articulado



Fuente: Altamira, 2003

También se han desarrollado grandes avances en la tecnología de los vehículos durante el período desde que los estudios se realizaron, obteniendo menores consumos y costos de circulación. Por estas razones, se recomienda la calibración del modelo HDM a las condiciones locales (ISOHDM, 2000c).

El modelo que se utiliza en HDM-4 para predecir el consumo de combustible establece que este es proporcional a los requisitos totales de potencia del motor, la cual considera tres componentes (ISOHDM, 2000b):

- Potencia de tracción: requerida para contrarrestar las fuerzas opuestas al movimiento
- Arrastre del motor: requerida para contrarrestar el arrastre interno del motor (o fricción)
- Potencia accesorio: requerida para mover los accesorios del vehículo, tales como el ventilador, la dirección asistida, el aire acondicionado, el alternador, etc.

La forma como matemáticamente, y en forma simplificada, se expresa esta proporcionalidad es con una función de la siguiente manera (ISOHDM, 2000c):

$$IFC = MAX (\alpha, \epsilon P_{tot}), \text{ que se puede expresar como:} \tag{18}$$

$$IFC = MAX (\alpha, \epsilon P_{tr} + \epsilon P_{engaccs}) \tag{19}$$

Donde: IFC = consumo de combustible instantáneo (ml/s)
 α = consumo de combustible en ralentí (ml/s)
 ϵ = factor de eficiencia combustible - potencia (ml/kW/s)
 P_{tot} = requisitos totales de potencia (kW)

Ptr = requisitos totales de potencia de tracción (kW)
 Pengaccs = potencia total del motor y los accesorios (kW)

La calibración del modelo de combustible se enfoca en los parámetros α y ϵ , los requisitos de potencia se estiman según las condiciones particulares de operación considerando velocidad y masa del vehículo, densidad del aire, área frontal y aerodinámica del vehículo, pendiente de la carretera, resistencia a la rodadura y clima (ISOHDM, 2000c), según expresiones y consideraciones establecidas en la literatura técnica del modelo, para lo cual se deben tener las precauciones correspondientes a un trabajo de calibración, como la identificación de variables a considerar, entre otras.

Las ecuaciones usadas para predecir la fuerza total son las siguientes (ISOHDM, 2000c):

$$F_{tr} = F_a + F_g + F_r \quad \text{-En Newtons, Ver ecuación (29)} \quad (20)$$

$$F_a = R_1 * V^2 \quad \text{-En Newtons, Efecto de la aerodinámica} \quad (21)$$

$$F_g = R_2 * GR \quad \text{-En Newtons, Efecto de la pendiente} \quad (22)$$

$$F_r = R_3 + R_4 * V^2 \quad \text{-En Newtons, Efecto del rodamiento} \quad (23)$$

Las variables R1 a R4 son simplificaciones de las variables de las ecuaciones actuales de HDM-4:

$$R_1 = 0.5 * RHO * CD * CDMULT * AF \quad (24)$$

$$R_2 = M * g \quad (25)$$

$$R_3 = FCLIM * CR_2 * (b_{11} * N_w + CR_1 * b_{12} * M) \quad (26)$$

$$R_4 = FCLIM * CR_2 * CR_1 * b_{13} \quad (27)$$

Las fuerzas totales son:

$$F_{tr} = R_3 + (R_1 + R_4) * V^2 + R_2 * GR \quad (28)$$

$$P_{tr} = F_{tr} * V / 1000 \quad (29)$$

Remplazando (28) en (29) se obtiene:

$$P_{tr} = ((R_3 + R_2 * GR) * V + (R_1 + R_4) * V^3) / 1000 \quad (30)$$

Donde: V = velocidad del vehículo (m/s)

RHO = densidad de la masa del aire (kg/m³)

CD = coeficiente de la tracción aerodinámica

CDMULT = multiplicador del coeficiente de la tracción aerodinámica

AF = área frontal proyectada (m²)

M = masa del vehículo (kg)

g = aceleración de la gravedad (m/s²)

Nw = cantidad de ruedas

CR1 y CR2 = parámetros del modelo de resistencia a la rodadura

b11 a b13 = parámetros del modelo de resistencia a la rodadura

GR = pendiente (%)

FCLIM = factor de ajuste climático

En la determinación de la masa del vehículo (M) se considera el peso del vehículo vacío, medio cargado, totalmente cargado y sobrecargado con base en la proporción de los mismos, así (ISOHDM, 2000c):

$$M = ((P_e * TARE) + P_h * (0.5 * TARE + 0.5 * GVW) + (P_f * GVW) + (P_o * z_o * GVW)) / 100 \quad (31)$$

Donde: M = promedio de la masa del vehículo (kg)

TARE = peso del vehículo vacío – Tara - (kg)

GVW = peso y carga máxima del vehículo, definido por el fabricante (kg)

P_i = porcentaje de vehículos vacíos -e-, medio cargados -h-, cargados -f- y sobrecargados -o- (%)

z_o = peso relativo de la sobrecarga de GVW (decimal)

Para calibrar los parámetros del modelo de consumo de combustible es necesario tener una serie de medidas genéricas de consumo de combustible o, alternativamente, disponer de modelos de consumo de combustible como los desarrollados usando técnicas de regresión lineal múltiple (ISOHDM, 2000c).

Para cada tipo de vehículo el consumo de combustible se calcula separadamente en el sentido de ascenso y descenso, y los resultados finalmente se promedian.

Como puede verse, el consumo de combustible está influenciado por diversas variables que, en forma conjunta y simultánea, permanentemente cambian de valor en la operación del vehículo; el estudio del consumo de combustible se realiza para cada variable en forma independiente, es decir haciendo que los demás parámetros estén controlados en valores definidos o estables (no variables), para luego hacer las combinaciones requeridas, por ejemplo pruebas con un mismo vehículo, velocidad constante, estado de carga único, etc.

Dentro del estudio del consumo de combustible no se evidencia que sea tenida en cuenta, para la validación de los modelos propuestos, la cantidad de carga que específicamente transporta el camión. En estudios previos esta situación se ha simplificado identificando visualmente si el vehículo está vacío, medio cargado o totalmente cargado (Chesher y Harrison, 1987), en otros por condiciones a plena carga y vacíos (Instituto Mexicano del Transporte, 2001, 2002a y 2002b) o solo totalmente cargados (Altamira, 2003); es este aspecto de la cantidad de carga o peso total del vehículo el que se analizará en este trabajo y se considera es el aporte más significativo, a nivel internacional, que la tesis aporta al conocimiento, al igual que el estudio y consideración de un camión para el que no se tiene evidencia de que se hayan hecho investigaciones con el mismo, se trata del camión clasificado como C3S3 por las autoridades de Colombia, que se trata de camión articulado con total de 6 (seis) líneas de rotación o ejes y peso total máximo de 52t.

En el Anexo A se presenta en forma detallada el modelo completo para la cuantificación del consumo de combustible que está dentro del modelo HDM-4.

Al estudiar este modelo se encuentra que variables con alta incidencia son la velocidad y peso del vehículo, conjuntamente con la pendiente de la carretera, coincidiendo con lo expresado por otros autores como Cañadas (2007) quien manifiesta que son la velocidad y la pendiente de la carretera.

Durante el estudio del modelo inmerso en el HDM-4 se encuentra que una de las fórmulas o ecuaciones matemáticas que se tiene en los manuales presenta un error que conlleva a estimar de forma equivocada el consumo de combustible, por lo que se realizaron las consultas respectivas ante los desarrolladores del software confirmando que efectivamente se tenía un error que afortunadamente era de edición pues el programa computacional está funcionando con la expresión en forma correcta; se trata en detalle de la ecuación (5.9) en la página E2-37 del Volumen 4 de los manuales del HDM-4 en la que el error consiste en que el denominador aparece como $(NUM_WHEELS * CS)/1000$, pero lo correcto es $NUM_WHEELS * CS * 1000$. Se menciona este detalle ya que se considera como importante hallazgo en la literatura y que sirve para alertar a otras personas igualmente interesadas en estos temas.

Para mayores detalles sobre los modelos de consumo de combustible se puede consultar varia literatura como Chesher y Harrison (1987), Greenwood y Bennett (1995), Altamira (2003), Greenwood (2003), Cañadas (2007), y por supuesto los manuales del HDM-4.

Por lo que se ha identificado hasta ahora, para el presente estudio se ha definido que las variables a considerar son:

- Peso del vehículo: principal elemento del trabajo por las razones expuestas,
- Pendiente de la carretera que tiene efecto relevante en el consumo de combustible según lo plantea Altamira (2003), y sobre la que además no se han encontrado referencias de estudios recientes en los que haya sido, excepto para valores bajos de la misma como puede ser inferiores o iguales a 1% que es el caso por ejemplo de Altamira (2003), por lo que considerar la pendiente de la carretera siendo esto un aporte de la presente tesis a nivel internacional y de impacto por las condiciones de buena parte de las carreteras en países con topografía montañosa como es el caso de Colombia.
- Velocidad del vehículo: es común en los demás estudios consultados y modelos conocidos en lo que se incluye el efecto de la resistencia del aire,

4. METODOLOGÍA INVESTIGATIVA

4.1 METODOLOGÍA GENERAL

La metodología general y en forma resumida que se establece para la realización de la tesis consiste en revisión bibliográfica en la que se presente el tema de estudio con el fin de obtener un adecuado conocimiento sobre el mismo e identificar las variables que inciden en el consumo de combustible, en particular la relacionada directamente con el modelo HDM-4 (en forma específica aspectos relacionados con la cantidad de carga), realización de pruebas para caracterizar el consumo de combustible de los camiones acorde con la cantidad de carga; finalmente proponer un modelo de estimación de consumo de combustible con el fin de validar y proponer ajustes al modelo pre-existente del HDM-4 de estimación de consumo de combustible, con base en los resultados obtenidos.

4.2 METODOLOGÍA DETALLADA

4.2.1 Revisión bibliográfica. Contempla los temas de consumo de combustible en los que se identifiquen las variables que lo definen y aquellas que tienen mayor incidencia en el mismo, modelos desarrollados y utilizados para su predicción, calibración y adaptación de estos modelos; esta literatura se compila de publicaciones como revistas técnicas (*journals*), trabajos de grado (tesis), memorias de eventos académicos, manuales de modelos, y consulta a especialistas sobre el tema, entre los cuales están los autores de la documentación previamente citada; en particular se tiene la documentación del modelo HDM-4.

El resultado de esta actividad en el desarrollo del trabajo se presenta en el capítulo 3.

De igual manera se hace análisis sobre la cantidad de carga posible en los camiones (para lo cual se revisan las normas legales establecidas en cuanto a pesos máximos permitidos para los vehículos que circulan en las carreteras) y su influencia en el consumo de combustible; y se indaga sobre métodos y procedimientos de transporte de carga, especificaciones técnicas de camiones y la experiencia que se tenga en empresas de transporte, en donde se haga seguimiento al comportamiento del consumo y uso de la flota vehicular.

Por otra parte se debe tener información de características del flujo vehicular, y funcionales de los tramos viales en los que se harán las pruebas, los cuales tienen influencia en los aspectos operacionales de los camiones.

Es importante considerar la técnica estadística para determinar la confiabilidad de los resultados con base en la preparación de pruebas y la validación de los resultados.

4.2.2 Parte experimental. Se inicia con la identificación de equipos para medir el consumo de combustible en vehículos en movimiento, para con esto definir la instrumentación de los vehículos y poder obtener la información necesaria del consumo de combustible y el efecto por la cantidad de carga; de igual manera deben definirse los tipos de camión a utilizar y seleccionar los tramos de carretera en los cuales se realizarán las pruebas de campo. Al definir estos aspectos se realizan las pruebas en campo en las que serán variables importantes, para cada tipo de vehículo, la cantidad de carga o peso total del vehículo y velocidad de recorrido.

Por lo anterior son de importancia el conocimiento y definición del equipo para la medición del consumo de combustible, camión a utilizar y tramos de carretera para las pruebas.

- Equipo para la medición del consumo de combustible: Para camiones y en general los vehículos con uso de Aceite Combustible Para Motores (ACPM), se debe tener presente la cantidad de combustible que alimenta al motor y el que retorna al tanque, durante el proceso de funcionamiento del vehículo.

La medición del consumo de combustible puede realizarse de acuerdo con dos opciones: volumen y flujo.

En la primera se determina el volumen total que consume el vehículo durante un determinado tiempo de utilización o distancia recorrida, siendo necesario iniciar la prueba con el vehículo totalmente provisionado de combustible y reaprovisionarlo al terminar, en este caso se pueden tener errores debido a las diferencias que se presentan en las operaciones de aprovisionamiento o tanqueo, en términos de varias de las condiciones que se pueden tener al realizar este aprovisionamiento como pueden ser la posición del vehículo y la velocidad de suministro de la máquina dispensadora, entre otros; posteriormente el volumen total de combustible consumido se relaciona con el tiempo de uso o la distancia recorrida. Una alternativa adicional es tener un tanque o recipiente auxiliar cerrado que posea marcas visibles de medida volumétrica y entonces cada cierto tiempo o distancia hacer las lecturas correspondientes.

La segunda opción contempla el uso de un flujómetro o caudalímetro que permita registrar el consumo efectivo que tiene el camión en un momento o durante un tiempo determinado, en este caso el equipo debe tener características que permitan identificar el consumo considerando el retorno al tanque por lo que deberá posiblemente tener 2 cámaras independientes, la diferencia de caudal entre la cámara de entrada y la de retorno determina el consumo. Para este caso algunas empresas han desarrollado este tipo de instrumentos por lo que este tipo de medida es mecánico aunque se pueda disponer de módulos que presentan en pantalla el consumo durante determinado tiempo o distancia recorrida. Alternativamente es posible identificar el consumo por medio del módulo del motor en el caso de que éste sea de tipo electrónico, considerando intervalos de tiempo de funcionamiento u operación del motor, para lo cual es necesario el uso de dispositivos que permitan descargar y almacenar la información correspondiente, en este caso la medición del consumo de combustible es por medios electrónicos.

Para la elaboración de la tesis se opta por el uso de la última de las opciones indicadas, es decir con medios electrónicos, debido a que los vehículos de modelo reciente (normalmente posteriores al año 2007) entran a operar con tecnología de tipo electrónico por lo que se están imponiendo para el transporte de carga, teniendo así mayor vigencia en el tiempo los resultados de la tesis. Así, mediante dispositivos electrónicos se tendrá el registro de consumo en períodos cortos de tiempo y posteriormente relacionarlo con otros de los parámetros estudiados como peso y velocidad del vehículo, y pendiente de la carretera.

- Camión a utilizar: Para la selección de los vehículos se tienen las siguientes consideraciones:
 - Representatividad en la flota vehicular: Inicialmente se eligen las categorías más representativas y posteriormente dentro de cada una de ellas el vehículo más representativo. Con esto se pretende que los vehículos adoptados sean representativos de la flota vehicular y del tipo o categoría al cual pertenece, con lo que se logra la validez del estudio para buena parte de vehículos de la flota existente.
 - Disponibilidad de vehículos y conductores para las pruebas: este aspecto es fundamental dado que es importante contar con vehículos para los cuales se permita la instrumentación y variabilidad de la carga a transportar, también conductores aptos para el vehículo y con disponibilidad para operar según las necesidades para poder cumplir de manera adecuada con el objetivo del estudio.
 - Perspectivas de evolución en la flota vehicular: considerar vehículos con buena expectativa de mantenerse en el mercado, situación recomendable para que los resultados obtenidos tengan validez en el tiempo por la presencia del vehículo y por su desarrollo tecnológico.
 - Modelo reciente (moderna tecnología): está estrechamente ligado a la consideración anterior en lo relacionado con el desarrollo tecnológico.
 - Buen estado del vehículo: se refiere a vehículo en buenas condiciones de operación mecánica y del buen estado de sus partes y accesorios.

Los vehículos que se contemplan en el estudio son camiones de dos tipos: rígido y articulado, que correspondan respectivamente a las clasificaciones C2 y >C5 del Ministerio de Transporte, el empleo de estos está condicionado a las consideraciones previamente enunciadas. El peso del vehículo será el del mismo (peso vacío o tara) mas la carga que transporte, para lo cual se realizarán las pruebas con el vehículo cargado a diferentes niveles de capacidad.

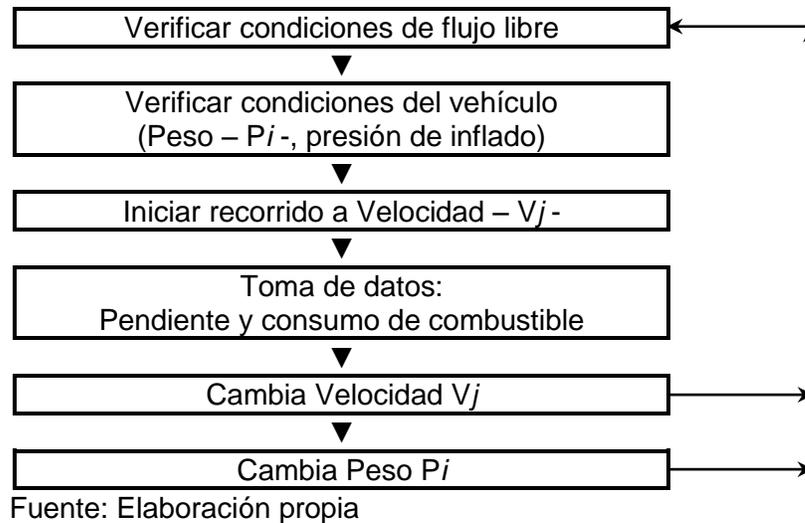
- Tramos de carretera sobre los que se harán los recorridos: Los tramos de carretera en los que realicen las pruebas de campo deben tener un régimen de flujo libre para la circulación de vehículos (características operacionales) y se debe poder conocer sus características funcionales (tipo y estado del pavimento, este último expresado según el Índice de Regularidad Internacional – IRI -) de tal manera que se puedan correlacionar con las demás variables del modelo de consumo de combustible.

En cuanto a las características operacionales se consideran algunos tramos de carretera en doble calzada ya que en estos es posible poder tener con mayor confianza

condiciones de flujo libre, y para el pavimento solamente el de tipo flexible con superficie de rodadura en asfalto.

Al tener identificados los tramos de carretera, vehículos y su instrumentación, se debe proceder con la realización de pruebas para lo cual inicialmente se verifican las condiciones de operación del tránsito (flujo libre) y del vehículo (peso, presión de inflado de las llantas, etc.) y posteriormente se inicia el recorrido hasta lograr condiciones estables de circulación a determinada velocidad, procediendo entonces a la toma de datos que relacionen velocidad, peso, pendiente y consumo de combustible; y eventualmente cualquiera otra que se identifique importante en la definición de la prueba. Posteriormente se realizan recorridos a otras velocidades para luego variar el peso del vehículo. En forma de diagrama, se presenta el proceso en la Figura 6.

Figura 6. Proceso para la realización de pruebas de campo



4.2.3 Factorial para la investigación. El factorial es el número de combinaciones de factores o parámetros y sus niveles de variación, el cual aumenta rápidamente con la cantidad de estos, especialmente con los niveles. Para conocer el factorial es necesario identificar los parámetros o factores y sus niveles de variación, para lo que se considera:

Factor o parámetro: son las variables o atributos del experimento.
Niveles: variación de los factores previamente definidos.

Así, el factorial es: $\prod \text{Nivel}^{\text{Parámetros}}$, siendo \prod la función productoria.

De lo indicado, esta propuesta de investigación contempla los siguientes parámetros o factores y rangos para los niveles de variación:

- Combustible: ACPM, un único tipo que es el disponible en la zona de estudio y sin variación en cuanto a mezclas que se puedan tener para la obtención de biocombustibles o uso de aditivos.

- Tipo de pavimento: Asfalto
- Estado del pavimento: bueno representado por bajos niveles de IRI, y seco.
- Régimen de flujo del tránsito: Flujo libre
- Vehículos: 2 tipos diferentes (camión rígido y camión articulado).
- Pendiente de carretera: positiva con valor máximo del 7,0 %.
- Peso de la carga: se considera niveles de carga hasta el 100% de la capacidad de carga legal para cada vehículo considerado.
- Velocidad de operación: como máximo el valor permitido en los tramos viales que se seleccionen. Aunque las condiciones de flujo libre son aquellas en las que los vehículos puedan circular a la velocidad deseada sin restricción, por ejemplo de otros vehículos o elementos del control del tránsito, y por consiguiente son velocidades muy próximas a las de diseño del tramo vial, se han considerado otras velocidades menores con el fin de identificar el efecto que produce la restricción a la libre circulación.

Aunque no es objeto de esta investigación conocer los efectos de la congestión, esto se contemplará parcialmente con los resultados que se obtienen al considerar velocidades menores a las del flujo libre, pues el efecto más representativo de la congestión es precisamente la disminución de la velocidad. Por otro lado, lo común en el transporte en ámbito rural es que los vehículos operen a “flujo libre”, excepto en los accesos a grandes ciudades o en inmediaciones a las casetas de peaje que representan una participación baja, menor al 5%, de la red vial primaria.

En la Tabla 2 se presentan los factores y sus niveles que se espera evaluar en la investigación.

Tabla 2. Factorial del experimento - Factores y niveles propuestos

Factor	Niveles	Valor
Combustible	1	ACPM
Tipo de pavimento	1	Flexible con asfalto
Estado del pavimento	1	Seco y con bajo IRI (<4)
Régimen de tránsito	1	Flujo libre
Camión	2	Rígido y Articulado
Pendiente longitudinal	3	Positiva, 7% máximo
Peso de la carga (t)	3	Cero hasta máxima según capacidad legal
Velocidad (km/h)	3	Máxima según tramo vial

Fuente: Elaboración propia

De la Tabla 2 se puede observar que se tienen cuatro (4) factores con un nivel de variación que corresponden a condiciones de operación y se mantendrán invariables durante la experimentación, un factor con dos (2) niveles, y tres (3) factores con tres (3) niveles de variación, dando como resultado que el factorial es 54, así:

$$\text{Factorial} = \prod \text{Nivel}^{\text{Factores}} = 1^4 * 2^1 * 3^3 = 54$$

En la Tabla 3 se muestra el factorial para el caso de uno de los camiones y una de las pendientes a considerar, que sirve como ejemplo para la preparación de las pruebas o medidas experimentales que permiten obtener datos para los análisis respectivos.

Tabla 3. Factores y niveles propuestos – Factorial para camión y pendiente

Factor	Valor
Combustible	ACPM
Tipo de pavimento	Flexible con asfalto
Régimen de tránsito	Flujo Libre
Estado del pavimento	Seco y con IRI bajo (<4)
Camión	Tipo 1
Pendiente longitudinal (%)	p1, p2 o p3
Peso de la carga (%)	P1
Velocidad (km/h)	P2
	P3
	V1 V2 V3 V1 V2 V3 V1 V2 V3

Fuente: Elaboración propia

4.2.4 Cantidad de datos. La cantidad de datos a ser recolectados serán el resultado de un procedimiento estadístico que permita obtener resultados con validez, mientras que es posible que en cada recorrido del tramo vial se puedan obtener datos para varios niveles, por ejemplo de la pendiente longitudinal de la carretera.

El tamaño apropiado de la muestra se obtendrá con la aplicación de la teoría del Diseño de Experimentos con la cual se puede optimizar la realización de pruebas o ensayos de manera eficiente (Gutiérrez y de la Vara, 2008), logrando ahorros económicos sin deteriorar la calidad de la investigación. El Diseño de experimentos, según lo plantean Gutiérrez y de la Vara (2008), consiste en planear y realizar un conjunto de pruebas con el objetivo de generar datos que, al ser analizados estadísticamente, proporcionen evidencias objetivas que permitan responder los interrogantes planteados por el experimentador sobre determinada situación. Lo anterior es presentado igualmente por otros autores entre los cuales se menciona a Montgomery (1991) y Moreno (1993).

Para el caso específico de esta investigación se estima la cantidad de pruebas o ensayos de campo con el método del Diseño Factorial en el cual el efecto de varios factores o parámetros es estudiado sobre una variable respuesta, de tal manera que se consideran todas las posibles combinaciones originadas por los diferentes niveles de dichos factores. Los factores y niveles son los planteados en las Tabla 2 y Tabla 3 presentadas anteriormente.

Para utilizar un enfoque estadístico en el diseño y análisis de un experimento es necesario que todas las personas involucradas en el proceso entiendan de qué se trata el problema, qué es lo que exactamente se va a estudiar, cómo se recolectarán los datos y tener una idea del análisis cuantitativo que se llevará a cabo (Montgomery, 1997, Citado por Salazar y Baena, 2009), con base en lo cual se define la cantidad necesaria de datos a recolectar para que sea suficiente y válida para los propósitos deseados.

El procedimiento que plantea Montgomery (1991) para diseñar un experimento es:

- Comprensión y planteamiento del problema
- Elección de factores y niveles

- Selección de la variable de respuesta
- Elección del diseño experimental o tipo de experimento
- Realización del experimento
- Análisis de datos, y
- Conclusiones y recomendaciones.

Este procedimiento se utiliza en la presente investigación, algunas de las actividades ya han sido realizadas mientras que otras se desarrollan posteriormente, con lo que se evidencia la aplicación de un adecuado procedimiento para el logro de los objetivos propuestos.

4.2.5 Procesamiento y análisis de información. Todos los datos de las observaciones hechas se procesarán convenientemente para correlacionarlos en forma estadística con el fin de depurar la base de datos y obtener así los que sean válidos para la investigación.

Una vez depurados los datos se hace un análisis de esta información para poder hacer las dos actividades básicas del estudio:

- Identificar el efecto de la cantidad de carga en el consumo de combustible, asociados a la pendiente de la carretera y la velocidad del vehículo, y
- Proponer ajustes al modelo del HDM-4 para el consumo de combustible de camiones, según las variables descritas en el punto anterior.

Los análisis anteriores conducen hacia los resultados finales y la validación, o no, de la hipótesis planteada para la investigación.

Se reitera que la comparación y análisis entre los consumos calculados con el modelo HDM-4 ajustado, a los vehículos y características de los tramos estudiados, con los consumos observados permiten validar los resultados para cada categoría de vehículo.

Se espera con el análisis de la información recopilada poder validar las hipótesis planteadas con lo cual se tendrá un avance significativo en las actividades de evaluación de proyectos viales, se amplía la aplicación del HDM-4 como herramienta validada por el Banco Mundial para dichas evaluaciones, se tendrá impacto en actividades como la planificación de carreteras y políticas de transporte, operación de vehículos tipo camión, definición de flota vehicular de carga para empresas transportadoras con las consecuentes implicaciones en el comercio a nivel nacional e internacional que se pueden dar por ejemplo a nivel de competitividad ante los tratados de libre comercio que se pactan entre países y el mercado cada vez más globalizado, y posible definición de políticas sobre combustibles, tareas todas estas que pueden ser objeto de estudios posteriores. Con aplicación específica para regiones a nivel nacional e internacional similares a las consideradas en el estudio

5. DISEÑO DEL EXPERIMENTO, OBTENCIÓN DE DATOS Y PROCESAMIENTO

Se presenta en este capítulo la manera como la metodología general propuesta en el numeral 4.2 es aplicada al estudio con el fin de obtener los datos requeridos de la investigación.

5.1 DISEÑO DEL EXPERIMENTO

A continuación se definen los diferentes aspectos que se deben considerar para la realización de las pruebas de campo.

- Equipo para la medición del consumo de combustible: como se expresa anteriormente, se opta por utilizar equipos de tipo electrónico para la medición del consumo de combustible, fundamentados en la vigencia y validez de este tipo de equipos de metrología asociados al equipamiento de los camiones cuyos motores son igualmente de tipo electrónico y que por consiguiente permiten un adecuado acople de los equipos de medición.

El equipo de medición seleccionado es denominado módulo o computador de abordó (OBC por las siglas en inglés de *On Board Computer*) que permite, entre otros, la medición y almacenamiento de la información del consumo de combustible por intervalo de tiempo, que se define en la programación y preparación de las pruebas, por lo que el equipo registra y almacena la cantidad de combustible (volumen) utilizado por el vehículo en el período de tiempo dado, con lo que se obtiene el flujo en unidades de volumen/tiempo.

En las pruebas se utiliza el computador de abordó con referencia FM3306 de la marca *Mix Telematics* cuyas características técnicas o especificaciones se presentan en el Anexo B; este equipo permite en forma adicional almacenar la ubicación del vehículo en el que se instale debido al GPS (*Global Position System*) que tiene incorporado y que por consiguiente permitirá correlacionar ubicación y consumo de combustible del vehículo. El uso de este equipo se decide con base en recomendación dada por la empresa LAP International (www.mix-lap.com) en su sede de Medellín (Colombia), de la organización Equitel, con experiencia en la instrumentación de vehículos para hacer seguimiento a su operación y ubicación. En la Figura 7 se presenta una fotografía del equipo completo con sus aditamentos o complementos para ser utilizado satisfactoriamente.

Para adecuado uso, y acorde con los fines deseados, el computador de abordó se complementa con un *datalink* que permite en forma específica, mediante el protocolo J1939 de los motores electrónicos que se utilizan, la transferencia y almacenamiento de la información del consumo de combustible; en la Figura 8 se muestra el equipo completamente armado con sus aditamentos y el *datalink* citado (de color blanco), listo para ser instalado en el vehículo deseado.

Figura 7. Fotografía del equipo FM3306 de *Mix Telematics*



Fuente: Elaboración propia

Figura 8. Fotografía del equipo FM3306 armado y con el *datalink*



Fuente: Elaboración propia

La programación del equipo se realiza para que el consumo de combustible sea registrado y almacenado en períodos de tiempo de un (1) segundo, la ubicación del vehículo mediante GPS con antena es definida en forma automática por el equipo; además se establece que mediante comunicación por línea de teléfono celular la información sea permanentemente enviada a un servidor para su almacenamiento y posterior consulta, ubicado en el centro de control de LAP International en Bogotá D.C., de esta manera los registros no se perderán en caso de algún evento indeseado en ruta.

- Camión a utilizar: El parque automotor en Colombia para el año 2006 era de 2670697 unidades sin contabilizar motocicletas, motocarros, motociclos, maquinaria agrícola e industrial, ni bicicletas, de los cuales casi el 7% corresponde a camiones (Ministerio de Transporte, 2006a; CONPES, 2007), con la distribución que se presenta en la Tabla 4 y se ilustra en la Figura 9, la clasificación de los camiones según su configuración que se observa corresponde respectivamente a las configuraciones definidas por el Ministerio de Transporte de Colombia.

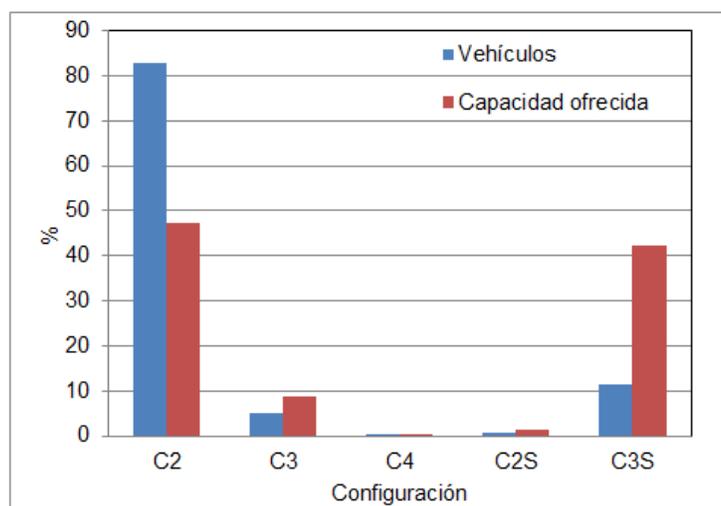
Se concluye de las Tabla 4 y Figura 9 que los camiones más representativos de la flota vehicular de camiones en Colombia son los de configuración C2 y C3S que corresponden a los rígidos con dos (2) líneas de rotación y los articulados con tres (3) líneas de rotación en la unidad tractora, respectivamente, tanto en cantidad de unidades como en capacidad ofrecida por carga.

Tabla 4. Distribución de camiones en Colombia - año 2006

Configuración del camión	Vehículos		Capacidad ofrecida	
	Cantidad	%	Toneladas	%
C2	162425	82,8	974550	47,3
C3	10010	5,1	179739	8,7
C4	204	0,1	4679	0,2
C2S	1218	0,6	28289	1,4
C3S	22418	11,4	872200	42,4
Total	196275	100,0	2059457	100,0

Fuente: CONPES, 2007 y Elaboración propia

Figura 9. Distribución de camiones en Colombia - año 2006



Fuente: CONPES, 2007 y Elaboración propia

Lo anterior se corrobora y complementa con la movilización de carga en Colombia para el año 2004 (Ministerio de Transporte, 2006b) en la que se puede identificar que los

camiones con configuraciones de dos (2) ejes y los camiones articulados con cabezotes de tres (3) ejes, o sea los C3S2 y C3S3, realizan el 87,6% de los viajes totales y se moviliza el 89,6% del total de las toneladas transportadas.

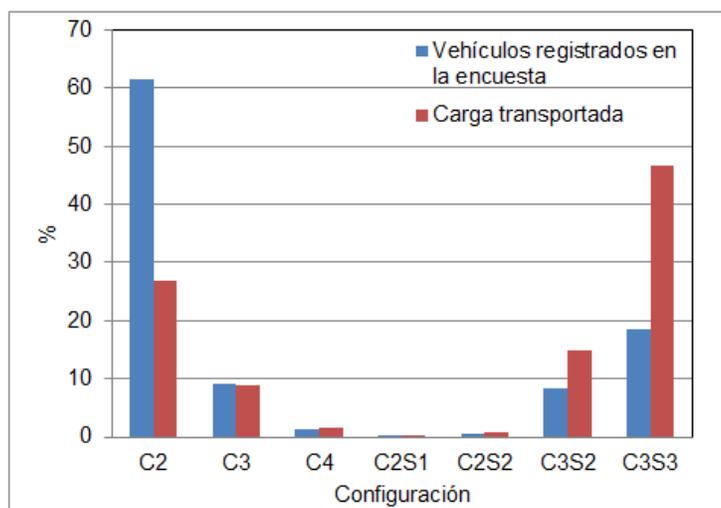
De la Encuesta de carga realizada en Colombia en el año 2004 (Ministerio de Transporte, 2006b) se obtiene, para los vehículos cuya carga está reportada en peso que representan el 97% del total de camiones encuestados, la información que se presenta en la Tabla 5 y se visualiza gráficamente en la Figura 10 de las que se puede concluir que los camiones con configuraciones C2 y C3S3 son los más representativos en cuanto a la cantidad de vehículos y carga que es transportada, con un total del 80,2% y 73,6% respectivamente.

Tabla 5. Distribución de camiones y carga transportada en Colombia
– Encuesta de carga 2004

Configuración	Vehículos registrados en la encuesta		Carga transportada	
	Cantidad	%	Toneladas	%
C2	81514	61,6	315693,3	26,9
C3	12118	9,2	105890,4	9,0
C4	1702	1,3	17043,2	1,5
C2S1	427	0,3	3889,9	0,3
C2S2	830	0,6	8363,4	0,7
C3S2	11129	8,4	175881,4	15,0
C3S3	24552	18,6	548478,3	46,7
Total	132272	100,0	1175239,9	100,00

Fuente: Ministerio de Transporte, 2006b y Elaboración propia

Figura 10. Distribución de camiones y carga transportada en Colombia
– Encuesta de carga 2004



Fuente: Ministerio de Transporte, 2006b y Elaboración propia

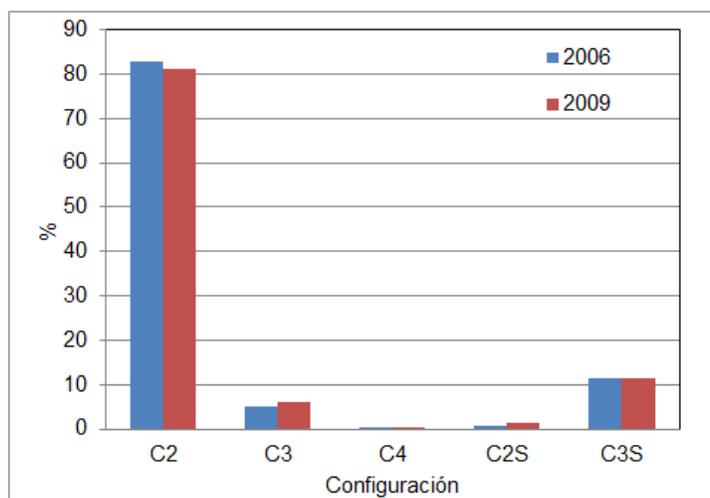
Datos más recientes (Ministerio de Transporte, 2010) muestran que la participación de los camiones tipo C3 ha aumentado en los últimos años, para el año 2009 la cantidad de camiones y composición entre los diferentes tipos se muestra en la Tabla 6; en la Figura 11 se ilustra el cambio de participación porcentual entre los diferentes tipos de camiones dentro de esta flota vehicular.

Tabla 6. Distribución de camiones en Colombia - año 2009

Configuración	Vehículos	
	Cantidad	%
C2	231721	81,1
C3	17158	6,0
C4	280	0,1
C2S	4132	1,5
C3S	32370	11,3
Total	285661	100,0

Fuente: Ministerio de Transporte, 2010 y Elaboración propia

Figura 11. Distribución de camiones en Colombia - años 2006 y 2009



Fuente: CONPES, 2007, Min. Transporte, 2010 y Elaboración propia

En la Figura 11 se observa que los camiones C2 han disminuido un poco su participación y que los C3S la mantienen, aunque ambos en valor absoluto son de mayor incremento; los C3 han aumentado ocupando el tercer lugar en el parque automotor de camiones y tienen mayor dinámica de crecimiento que se evidencia con la masiva entrada de este tipo de vehículos para actividades de movimiento de carga, en especial en el sector de la construcción por el auge en los últimos años y que seguirá así por efecto de la creciente construcción de infraestructura vial, explotación minera y entrada en vigencia de tratados de libre comercio con otros países, que

auguran mayor movimiento de carga por las carreteras (El Espectador, 2011; Umaña, 2012; Bohórquez, 2012).

El camión C2 por su menor capacidad de carga es especialmente utilizado para viajes cortos como los de ambiente urbano y metropolitano, tal como lo muestra Mesa (2008) que relacionó el tamaño de los envíos (en toneladas) con la distancia recorrida, no siendo entonces el preferido para recorridos largos.

Por lo indicado en párrafos anteriores y las consideraciones enunciadas en el numeral 4.2.2 sobre los criterios para la selección de los camiones como representatividad, disponibilidad, perspectivas de evolución en la flota vehicular, y modelo reciente (moderna tecnología), los camiones que se utilizan en las pruebas de campo son de dos tipos: rígido con tres (3) y articulado con 6 (seis) líneas de rotación, clasificados como C3 y C3S3 por el Ministerio de Transporte de Colombia, ver Figura 12.

Figura 12. Fotografías - Camiones utilizados



Camión Tipo C3

Camión Tipo C3S3

Fuente: Elaboración propia

Para los vehículos mostrados en la Figura 12 se tienen las características básicas que se presentan en la Tabla 7, mientras que en el Anexo C se muestran mayores detalles.

Tabla 7. Características básicas de los camiones utilizados en las pruebas

Característica	Camión C3	Camión C3S3
Marca	<i>Kenworth</i>	
Tipo y marca de motor	Electrónico - <i>Cummins</i>	
Carrocería	Volco	
Placa	SNP567	SNN159
Modelo (año)	2011	2007
Línea vehículo	T800	T800
Línea motor	ISM350	ISX400
Cilindrada (cc)	10800	15000
Líneas de rotación (No.)	3	6
Llantas (No.)	10	22
Peso vacío (kg)	11500	19000
Peso bruto (kg)	28000	52000

Fuente: Elaboración propia

La razón por la que se utilizan vehículos marca *Kenworth* es debido a su reconocimiento en el mercado, por ejemplo en Colombia de los C3S3 tiene participación del 35.3% (por marca) y en los últimos años ha crecido en forma importante posicionándose como la principal marca; están equipados con motores *Cummins* que son los de mayor participación en el medio, tienen respaldo de fábrica para vehículo y motor con representantes y talleres autorizados con experiencia y reconocimiento. Otras marcas, al año 2004, para estos camiones C3S3 tienen la siguiente participación según el Ministerio de Transporte (2006b): Chevrolet con el 37.1%, International 7.5% lo mismo que Ford. Para los camiones C3 se puede decir que en entre los años 2000 y 2004 la marca *Kenworth* duplicó su participación en el mercado colombiano pasando de estar en el lugar seis (6) con el 3.4% al lugar tres (3) con el 8%, según análisis de datos del Ministerio de Transporte (2006b).

El uso de estos camiones con elemento de carga, sobre chasis en el caso del C3 o del semirremolque para el C3S3, de tipo basculante o volteo (conocido como volqueta) facilita el proceso de cargue y descargue, además el área frontal y transversal del vehículo (área de ataque para el coeficiente de dragado aerodinámico) es la misma siempre garantizándose con el cubrimiento total del volteo aún en condición de vacío.

Previo al inicio de las pruebas de campo se hace revisión técnica y mecánica a los camiones para garantizar su buen estado y que por ende las mediciones hechas sean adecuadas, pues algún desperfecto podría alterarlas. Esta actividad se realiza con el apoyo de Cummins De Los Andes (www.cumandes.com) en Medellín (Colombia), quienes mantuvieron disposición para apoyar en este sentido la investigación; el soporte de estas revisiones se presenta en el Anexo D.

El peso del vehículo será el del mismo (peso vacío o tara) mas la carga que transporte, para lo cual se realizarán las pruebas con el vehículo cargado a diferentes niveles de capacidad para diferentes condiciones de pendiente longitudinal disponibles en la carretera a considerar, y de velocidad de operación. La carga a utilizar es material de pavimento a reciclar, prestado en este caso por la Secretaría de Obras Públicas del Municipio de Medellín disponible en sus instalaciones de la planta de pavimentos en donde es posible realizar las operaciones de cargue (ver Figura 13), y descargue.

Figura 13. Fotografías - Maniobras de cargue



Camión C3



Camión C3S3

Fuente: Elaboración propia

En el mismo lugar, donde se dispone del material y posibilidad de cargue y descargue, puede hacerse pesaje del vehículo debido a plataforma instrumentada para registrar el peso total del vehículo, como puede verse en las fotografías mostradas en la Figura 14, en las que se puede apreciar parte de la plataforma que permite realizar el pesaje del vehículo y de la pantalla que muestra el peso registrado; el sistema de pesaje es de continuo uso y mantenimiento permitiendo obtener resultados válidos, sin embargo en forma complementaria posteriormente el peso se verifica en estación de pesaje de camiones dispuesta en la carretera Medellín – Guarne en donde, como se indica posteriormente, se realizan las pruebas de campo, ver Figura 15.

Figura 14. Fotografías - Plataforma de pesaje y pantalla indicadora de peso



Plataforma de pesaje

Fuente: Elaboración propia



Pantalla indicadora de peso

Figura 15. Estación de pesaje en carretera Medellín-Guarne



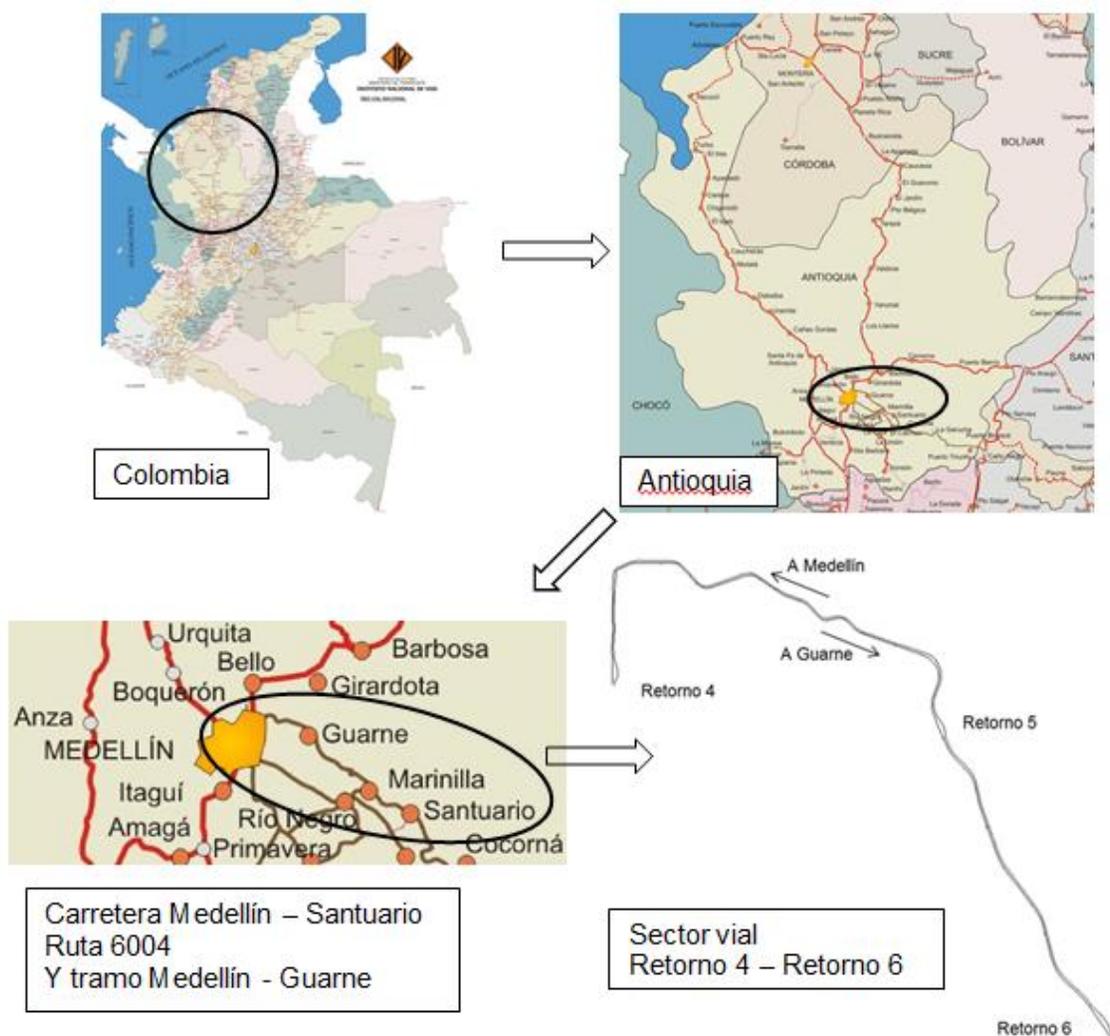
Fuente: www.devimed.com.co/galeria.html.

- Tramos de carretera sobre los que se harán los recorridos: Contemplando lo descrito en el numeral 4.2.2 y otras consideraciones de índole práctico se elige realizar las pruebas en la carretera nacional Transversal Medellín – Bogotá, denominada Ruta 60 según nomenclatura del Ministerio de Transporte, particularmente en el tramo vial

Medellín – Santuario cuyo código es 6004 (Ministerio de Transporte, 1999) ubicado en el Departamento de Antioquia, ver Figura 16, que actualmente opera en esquema de concesión con la empresa Devimed S.A.

Las pruebas se realizan en un sector entre la ciudad de Medellín y el municipio de Guarne que tiene doble calzada siendo cada calzada de funcionamiento unidireccional; por sus características físicas y operativas se clasifica como Multicarril según el Manual de Capacidad de Carreteras de los Estados Unidos de Norteamérica que presenta el *Transportation Research Board - TRB (Transportation Research Board, 2000)*. Específicamente se hacen recorridos entre los retornos 4 y 6 distantes entre si 8km, ver Figura 16; cada recorrido contempla iniciarse en el retorno 4 y regresar al mismo, por lo que cada recorrido es de 16km en total.

Figura 16 Ubicación general de la carretera en la que se hacen pruebas de campo



Fuente: www.invias.gov.co y Elaboración propia

Las principales características de este tramo de carretera son:

- Geométricas: se tienen dos (2) calzadas cada una con dos (2) carriles de 3,65m de ancho, bermas de 0,90m y separador central de 1m, discurre por terreno escarpado a plano presentando diferentes pendientes longitudinales en el rango 0,5 a 7,0%, su velocidad de diseño es variable a lo largo de su recorrido entre 60 y 80 km/h.

La característica geométrica de la carretera que es de interés en el estudio, es decir la pendiente longitudinal, se obtiene mediante levantamiento topográfico, para los tramos rectos que se identifica tienen pendiente longitudinal constante en al menos 100m de longitud que permitan obtener datos del consumo de combustible.

- Operacionales: en el sector de carretera definido se tiene, para el año 2008, el tránsito promedio diario (TPD) que se muestra en la Tabla 8, según el Instituto Nacional de Vías – INVIAS - del Ministerio de Transporte (INVIAS, 2008), que son los últimos datos oficiales publicados y disponibles sobre el volumen en esta carretera.

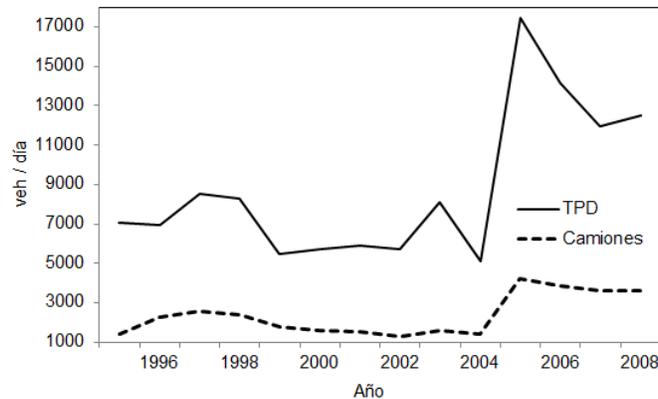
Tabla 8. Tránsito Promedio Diario (TPD) y composición para el sector vial. Año 2008

Tramo	Longitud (km)	TPD	Composición (%)		
		(Año 2008)	Livianos	Buses	Camiones
Acevedo – Guarne	25	12515	56	15	29

Fuente: INVIAS, 2008 y Elaboración propia

Al año 2011 (en el cual se realizan los trabajos de campo), considerando una tendencia de crecimiento del 3% anual acorde con el de otros corredores viales, se estima que el TPD en este sector es de 13675 vehículos. Esta tasa de crecimiento no obedece a la tendencia histórica del TPD según datos del Instituto Nacional de Vías que se presentan gráficamente para el TPD y los camiones en la Figura 17, ya que dicho comportamiento es variable debido a situaciones como cierres temporales y definitivos por procesos constructivos de adecuación de la carretera a estándares mayores, o mejoras debidas a daños ocasionados por fenómenos naturales.

Figura 17. Evolución histórica del TPD en el sector vial considerado



Fuente: INVIAS, 2006, 2007 y 2008, y Elaboración Propia

Al analizar tramos representativos de este sector vial, con la metodología para carretera multicarril del Manual de capacidad de carreteras de los Estados Unidos de Norteamérica (*Transportation Research Board, 2000*), se encuentra que el nivel de servicio es B en el tramo crítico, ya que la densidad máxima encontrada es 11pc/km/carril, lo que indica que el flujo es libre bajo condiciones normales de operación, así es válida la elección de la carretera para los fines propuestos; debe además considerarse que la exigencia en niveles de servicio en Norteamérica es mayor que en nuestro medio lo que significa que estamos con buen margen de respaldo para asegurar que en condiciones normales de operación existe flujo libre en el sector vial donde se realizan las pruebas.

La condición de flujo libre se verifica, durante la realización de los trabajos de campo, de forma visual al identificar que no existan obstrucciones al tránsito de los vehículos y que la circulación del camión en el que se hacen las mediciones no sea interferida por los demás vehículos que transitan por la carretera.

- Funcionales: la carretera se encuentra totalmente pavimentada con superficie de rodadura en asfalto, el estado de la carretera es bueno según apreciación visual y de recorrido en la vía, el IRI que es menor a 3.5m/km de acuerdo con auscultación hecha por el concesionario. Esta auscultación se hace de manera periódica por el concesionario para identificar el estado de la red vial y programar las acciones correctivas respectivas, para cumplir así con requisitos de serviciabilidad que exige el gobierno.
- Factorial para la investigación. En el numeral 4.2.3 se presenta lo general con respecto a este asunto.

Para el desarrollo de la investigación se utiliza la teoría del diseño de experimentos tal como se indica en el numeral 4.2.4; se define que se harán dos (2) tipos de pruebas de acuerdo a la forma como se espera sean los resultados obtenidos, pues al observar el comportamiento del consumo de combustible en unidades de volumen entre distancia (por ejemplo litros/km) que se tiene en las Figura 1 y Figura 3, puede apreciarse que para velocidades hasta 45km/h se percibe que hay curvatura, mientras que para velocidades mayores el comportamiento tiende a ser lineal. Así para el caso de pendientes altas, que implican menores velocidades, se establece considerar mayor cantidad de niveles para los parámetros pues de esta manera se puede identificar de mejor manera el efecto de curvatura (Gutiérrez y de la Vara, 2008; Montgomery, 1991); mientras que para pendientes bajas, que posibilitan velocidades mayores, la cantidad de niveles es menor ya que el efecto de curvatura no se considera importante.

En el primero de los casos se utiliza el diseño de experimentos tipo factorial 3^K que significa utilizar "K" factores con tres (3) niveles cada uno, y factorial 2^K para el segundo de los casos.

Definida la cantidad de niveles es posible determinar el factorial para cada una de las pruebas, recordando que el factorial es el número de combinaciones de factores o parámetros y sus niveles de variación.

La investigación contempla los parámetros o factores y niveles de variación para ellos, según el diseño factorial definido, que se presentan en la Tabla 9.

Tabla 9. Factores y niveles en la investigación – Factorial de experimento

Factor	Niveles	
	Diseño 3 ^K	Diseño 2 ^K
Combustible	1	1
Tipo de pavimento	1	1
Estado del pavimento	1	1
Régimen de tránsito	1	1
Camión	2	2
Pendiente longitudinal (%)	3	2
Peso de la carga (%)	3	2
Velocidad (km/h)	3	2

Fuente: Elaboración propia

Por lo presentado en la Tabla 9 se tienen cuatro (4) parámetros con un nivel de variación que corresponden a condiciones de operación y se mantendrán invariables durante la experimentación, un parámetro con dos (2) niveles relativos a cada uno de los camiones que se utilizará, y tres (3) parámetros con tres (3) o dos (2) niveles de variación, de acuerdo con el diseño experimental propuesto, dando como resultado que el factorial para cada caso es:

$$\text{Factorial para } 3^K = \prod \text{ Nivel}^{\text{Factores}} = 1^4 * 2^1 * 3^3 = 54$$

$$\text{Factorial para } 2^K = \prod \text{ Nivel}^{\text{Factores}} = 1^4 * 2^4 = 16$$

Así, para cada camión son necesarios 27 datos en el caso del diseño factorial 3^K, y 8 datos para el diseño factorial 2^K. En cada caso un dato corresponde a un valor de consumo según las condiciones de la experimentación, por lo que cada dato se corresponde con uno de los recorridos que se haga en la carretera según el diseño experimental y el factorial.

- Definición del diseño experimental: el diseño experimental se define mediante la teoría del Diseño de Experimentos con la cual se optimiza la realización de pruebas o ensayos de manera eficiente (Gutiérrez y de la Vara, 2008), incurriendo en ahorros económicos sin deteriorar la calidad de la investigación.

El Diseño de experimentos consiste en planear y realizar un conjunto de pruebas con el objetivo de generar datos que proporcionan evidencias objetivas para responder los interrogantes planteados por el experimentador sobre determinada situación y obtener conclusiones válidas, con base en métodos estadísticos de análisis (Gutiérrez y de la Vara, 2008; Montgomery, 1991; Moreno, 1993).

Los diseños factoriales son más eficientes que el tradicional experimento de mover un factor a la vez, utilizado cuando no se conoce del diseño de experimentos (Gutiérrez y de la Vara, 2008).

Para el caso específico de esta investigación se estima la cantidad de pruebas o ensayos de campo con el método del Diseño Factorial en el cual el efecto de varios factores o parámetros es estudiado sobre una variable respuesta, de tal manera que se consideran todas las posibles combinaciones originadas por los diferentes niveles de dichos factores. Los factores y cantidad de niveles son los planteados en la Tabla 9.

Para cada uno de los camiones utilizados en las pruebas se definen los valores de los niveles para los parámetros que tienen variabilidad que son la pendiente de la carretera, el peso y la velocidad del vehículo. En las Tabla 10 y Tabla 11 se muestran los valores definidos de acuerdo con las características del sector de carretera y de los mismos vehículos, tal como se describe a continuación.

Tabla 10. Factores, niveles y valores de niveles - Camión C3S3

Factor	Diseño 3 ^K		Diseño 2 ^K	
	Niveles	Valores	Niveles	Valores
Pendiente carretera (%)	3	7,0 - 5,2 - 2,0	2	2,0 - 0,6
Peso total del vehículo (t)	3	51,95 - 26,28 - 19,09	2	51,95 - 19,09
Velocidad del vehículo (km/h)	3	35 - 30 - 25	2	60 - 40

Fuente. Elaboración propia

Tabla 11. Factores, niveles y valores de niveles - Camión C3

Factor	Diseño 3 ^K		Diseño 2 ^K	
	Niveles	Valores	Niveles	Valores
Pendiente carretera (%)	3	7,0 - 5,2 - 2,0	2	2,0 - 0,6
Peso total del vehículo (t)	3	27,99 - 17,18 - 11,72	2	27,99 - 11,72
Velocidad vehículo (km/h)	3	45 - 35 - 25	2	70 - 50

Fuente. Elaboración propia

La elección de las pendientes son el resultado de realizar nivelación topográfica de los tramos rectos en el sector de estudio e identificar sus longitudes, para posteriormente seleccionar aquellos tramos con pendientes máxima, baja e intermedia, que puedan ser útiles para los casos de los factoriales 3^K y 2^K, y con longitud mayor a 100m que es suficiente para registrar consumo de combustible. En la Tabla 12 se presentan los datos de los tramos que son elegidos para las mediciones en las pruebas, y en la Figura 18 fotografías que los ilustran.

Tabla 12. Datos de tramos para mediciones

Tramo	Abscisa	Recorrido hacia	Longitud (m)	Pendiente (%)
1	15+200	Guarne	100	7.0
2	17+700	Medellín	120	5.2
3	18+600	Medellín	300	2.0
4	19+200	Medellín	150	0.6

Fuente: Elaboración propia

Estos tramos de la carretera seleccionados para en ellos identificar el consumo de combustible se encuentran ubicados en altitudes entre los 2150 y 2200m sobre el nivel del mar.

Figura 18. Fotografías de los tramos para mediciones



Tramo 1 – K15+200



Tramo 2 17+700



Tramo 3 18+600



Tramo 4 19+200

Fuente: Elaboración propia

Los valores correspondientes al peso del vehículo se definen así: el peso máximo según lo permite la norma en Colombia, el mínimo es el vehículo sin carga, mientras que el intermedio corresponde a un valor cercano a la mitad del peso máximo según la posibilidad de carga en el momento de la ejecución de las pruebas. Así para los camiones utilizados se tiene que para el camión C3S3 el peso máximo permitido es 52t, mientras que el peso sin carga es de 19t; para el C3 el peso máximo permitido es

28t y su peso sin carga es de 11.7t; algunos camiones tienen peso mínimo diferente debido fundamentalmente al tipo de aditamento que utilizan para la carga.

Para las velocidades se selecciona la máxima que puede desarrollar el vehículo en las condiciones extremas de operación como son la pendiente más fuerte y mayor peso, para lo que se realizaron mediciones previas que permitieran identificar estos valores.

Con lo definido en las Tabla 10 y Tabla 11 se procede a diseñar el orden de ejecución de las pruebas y la cantidad de mediciones necesarias, para esto se ordenan los factores y sus niveles para hacer la aleatorización en el diseño del experimento, que es requisito para el uso de tal método de trabajo (Gutiérrez y de la Vara, 2008; Montgomery, 1991); además la asignación de la cantidad de réplicas que consisten en la aplicación repetida de un tratamiento a unidades experimentales (Castaño y Domínguez, 2010); o según lo que indican Gutiérrez y de la Vara (2008) de que una réplica es cada corrida de todos los tratamientos del arreglo factorial.

La utilidad de las réplicas se debe a que con una réplica no es posible la estimación de errores (Montgomery, 1991); mientras que varias réplicas permiten, entre otras, reducir la variabilidad de promedios, controlar variabilidad del error, y detectar diferencias entre medias mejorando la precisión (Castaño y Domínguez, 2010).

Se definen tres (3) réplicas para cada prueba, que es una cantidad suficiente para control de medias y errores, por lo que para cada camión son necesarios 81 datos, 27 por cada réplica, para el caso del diseño factorial 3^K ; mientras que para el 2^K son 24 datos, 8 para cada réplica; como se explica antes.

Con base en restricciones de orden práctico en la realización de las pruebas de campo se define hacer primero los recorridos y mediciones con los camiones al máximo peso posible ya que esta condición es restrictiva para el logro de la velocidad posible según la pendiente de la carretera, para posteriormente, en forma secuencial, disminuir dicho peso y realizar los recorridos y mediciones respectivas, ya que los procesos de cargue y descargue son dispendiosos por las actividades propias de estas y el sitio donde se deben hacer (espacio, material, equipos de cargue y pesaje), por lo que se incrementan considerablemente el tiempo y los recursos económicos necesarios para las pruebas, estando en contravía con parte de los objetivos del Diseño de experimentos que es optimizar tiempo y recursos en la investigación (Gutiérrez y de la Vara, 2008; Montgomery, 1991); y como lo indican Castaño y Domínguez (2010) de que se trata es de realizar el experimento de manera eficiente con el mínimo de recursos materiales y tiempo. Además se debe tener control sobre el peso para que sea el mismo y no se modifique el nivel correspondiente, por lo que modificar continuamente el peso no garantiza poder tenerlo en el mismo nivel deseado. Este aspecto conocido como “Bloque” y que se debe a la existencia de un factor para el que es difícil modificar los valores de los niveles, es válido en los procesos experimentales y se puede dar por diferentes razones que deben ser válidas (Gutiérrez y de la Vara, 2008), como la que se tiene en este caso; siendo importante que lo establecido en cuanto a la aleatorización y bloqueo se mantenga durante las pruebas para evitar sesgos innecesarios (Moreno, 1993).

Acorde con los factores, niveles y valores de los mismos, presentados en la Tabla 10, el número de réplicas y las consideraciones expresadas, en la Tabla 13 se muestra el programa de pruebas con el camión C3S3 para el diseño factorial 3^K , mientras que en la Tabla 14 se presenta el diseño factorial 2^K para el mismo camión. Para el camión C3 se procede de igual manera pero con los datos consignados en la Tabla 11, por lo que el programa de pruebas para para dicho camión se presentan en las Tabla 15 y Tabla 16 para los diseños factoriales 3^K y 2^K respectivamente.

Tabla 13. Diseño factorial 3^K para camión C3S3

Orden	Peso (t)	Pendiente (%)	Velocidad (km/h)	Orden	Peso (t)	Pendiente (%)	Velocidad (km/h)	Orden	Peso (t)	Pendiente (%)	Velocidad (km/h)
1	51.95	7.0	35	28	26.28	2.0	30	55	19.09	7.0	25
2	51.95	5.2	25	29	26.28	7.0	35	56	19.09	2.0	25
3	51.95	2.0	30	30	26.28	7.0	30	57	19.09	2.0	30
4	51.95	7.0	30	31	26.28	5.2	35	58	19.09	5.2	35
5	51.95	5.2	35	32	26.28	2.0	35	59	19.09	5.2	30
6	51.95	5.2	35	33	26.28	2.0	25	60	19.09	2.0	25
7	51.95	7.0	25	34	26.28	5.2	30	61	19.09	5.2	25
8	51.95	2.0	35	35	26.28	2.0	35	62	19.09	2.0	30
9	51.95	7.0	25	36	26.28	7.0	35	63	19.09	2.0	35
10	51.95	2.0	30	37	26.28	2.0	30	64	19.09	7.0	30
11	51.95	7.0	35	38	26.28	7.0	30	65	19.09	5.2	35
12	51.95	7.0	30	39	26.28	2.0	30	66	19.09	2.0	25
13	51.95	7.0	35	40	26.28	2.0	35	67	19.09	7.0	35
14	51.95	5.2	30	41	26.28	7.0	25	68	19.09	5.2	30
15	51.95	2.0	30	42	26.28	5.2	30	69	19.09	2.0	35
16	51.95	2.0	35	43	26.28	5.2	30	70	19.09	5.2	30
17	51.95	7.0	25	44	26.28	5.2	35	71	19.09	2.0	35
18	51.95	2.0	35	45	26.28	2.0	25	72	19.09	5.2	35
19	51.95	2.0	25	46	26.28	7.0	25	73	19.09	5.2	25
20	51.95	5.2	35	47	26.28	5.2	25	74	19.09	7.0	25
21	51.95	5.2	30	48	26.28	5.2	25	75	19.09	2.0	30
22	51.95	2.0	25	49	26.28	7.0	35	76	19.09	7.0	35
23	51.95	5.2	30	50	26.28	7.0	25	77	19.09	7.0	30
24	51.95	5.2	25	51	26.28	5.2	35	78	19.09	7.0	25
25	51.95	2.0	25	52	26.28	5.2	25	79	19.09	7.0	35
26	51.95	7.0	30	53	26.28	2.0	25	80	19.09	5.2	25
27	51.95	5.2	25	54	26.28	7.0	30	81	19.09	7.0	30

Fuente: Elaboración propia

Tabla 14. Diseño factorial 2^K para camión C3S3

Orden	Peso (t)	Pendiente (%)	Velocidad (km/h)	Orden	Peso (t)	Pendiente (%)	Velocidad (km/h)
1	51.95	0.6	40	13	19.09	0.60	40
2	51.95	0.6	60	14	19.09	2.00	40
3	51.95	2.0	60	15	19.09	0.60	40
4	51.95	2.0	40	16	19.09	0.60	60
5	51.95	0.6	60	17	19.09	0.60	60
6	51.95	2.0	40	18	19.09	0.60	40
7	51.95	0.6	40	19	19.09	0.60	60
8	51.95	0.6	60	20	19.09	2.00	60
9	51.95	2.0	60	21	19.09	2.00	60
10	51.95	0.6	40	22	19.09	2.00	40
11	51.95	2.0	40	23	19.09	2.00	40
12	51.95	2.0	60	24	19.09	2.00	60

Fuente: Elaboración propia

Tabla 15. Diseño factorial 3^K para camión C3

Orden	Peso (t)	Pendiente (%)	Velocidad (km/h)	Orden	Peso (t)	Pendiente (%)	Velocidad (km/h)	Orden	Peso (t)	Pendiente (%)	Velocidad (km/h)
1	27.99	7.0	35	28	17.18	2.0	35	55	11.72	7.0	25
2	27.99	5.2	25	29	17.18	7.0	45	56	11.72	2.0	25
3	27.99	2.0	35	30	17.18	7.0	35	57	11.72	2.0	35
4	27.99	7.0	35	31	17.18	5.2	45	58	11.72	5.2	45
5	27.99	5.2	45	32	17.18	2.0	45	59	11.72	5.2	35
6	27.99	5.2	45	33	17.18	2.0	25	60	11.72	2.0	25
7	27.99	7.0	25	34	17.18	5.2	35	61	11.72	5.2	25
8	27.99	2.0	45	35	17.18	2.0	45	62	11.72	2.0	35
9	27.99	7.0	25	36	17.18	7.0	45	63	11.72	2.0	45
10	27.99	2.0	35	37	17.18	2.0	35	64	11.72	7.0	35
11	27.99	7.0	45	38	17.18	7.0	35	65	11.72	5.2	45
12	27.99	7.0	35	39	17.18	2.0	35	66	11.72	2.0	25
13	27.99	7.0	45	40	17.18	2.0	45	67	11.72	7.0	45
14	27.99	5.2	35	41	17.18	7.0	25	68	11.72	5.2	35
15	27.99	2.0	35	42	17.18	5.2	35	69	11.72	2.0	45
16	27.99	2.0	45	43	17.18	5.2	35	70	11.72	5.2	35
17	27.99	7.0	25	44	17.18	5.2	45	71	11.72	2.0	45
18	27.99	2.0	45	45	17.18	2.0	25	72	11.72	5.2	45
19	27.99	2.0	25	46	17.18	7.0	25	73	11.72	5.2	25
20	27.99	5.2	45	47	17.18	5.2	25	74	11.72	7.0	25
21	27.99	5.2	35	48	17.18	5.2	25	75	11.72	2.0	35
22	27.99	2.0	25	49	17.18	7.0	45	76	11.72	7.0	45
23	27.99	5.2	35	50	17.18	7.0	25	77	11.72	7.0	35
24	27.99	5.2	25	51	17.18	5.2	45	78	11.72	7.0	25
25	27.99	2.0	25	52	17.18	5.2	25	79	11.72	7.0	45
26	27.99	7.0	45	53	17.18	2.0	25	80	11.72	5.2	25
27	27.99	5.2	25	54	17.18	7.0	35	81	11.72	7.0	35

Fuente: Elaboración propia

Tabla 16. Diseño factorial 2^K para camión C3

Orden	Peso (t)	Pendiente (%)	Velocidad (km/h)	Orden	Peso (t)	Pendiente (%)	Velocidad (km/h)
1	27.99	2.0	70	13	11.72	0.60	50
2	27.99	0.6	50	14	11.72	2.00	50
3	27.99	0.6	70	15	11.72	0.60	50
4	27.99	2.0	70	16	11.72	0.60	70
5	27.99	2.0	50	17	11.72	0.60	70
6	27.99	0.6	70	18	11.72	0.60	50
7	27.99	2.0	50	19	11.72	0.60	70
8	27.99	0.6	50	20	11.72	2.00	70
9	27.99	0.6	70	21	11.72	2.00	70
10	27.99	2.0	70	22	11.72	2.00	50
11	27.99	0.6	50	23	11.72	2.00	50
12	27.99	2.0	50	24	11.72	2.00	70

Fuente: Elaboración propia

5.2 EJECUCIÓN DE PRUEBAS

Al tener identificados los tramos de carretera, vehículos a utilizar y su instrumentación, y el programa de pruebas se procede con la realización de estas para la obtención de los datos o la información que luego se procesa para obtener los resultados.

Se inicia el proceso con la verificación del estado técnico-mecánico del camión procediendo a realizar los correctivos necesarios para tener condiciones adecuadas, se instrumenta el vehículo con el computador de abordo (Figura 7 y Figura 8) configurándolo y haciendo recorrido de prueba para verificar el funcionamiento y remisión de datos al lugar de registro y almacenamiento, se complementa la instrumentación con el uso de GPS con antena externa (ver Figura 19) para corroborar la velocidad de operación en el momento de los recorridos y almacenar información de posición geográfica que luego se coteja con la del computador de abordo, las características de este GPS son adecuadas para el trabajo deseado máxime al utilizar la antena externa que permite mayor confiabilidad de la información que registra y almacena. Este par de equipos (computador de abordo y GPS) se sincronizan en tiempo haciendo que sus relojes internos reporten y registren la misma hora durante las pruebas, esto es importante para poder posteriormente correlacionar sus datos.

Figura 19. Fotografía de GPS y antena externos



Fuente: Elaboración propia

Posteriormente se carga el camión al nivel de peso deseado y se tapa el volco para garantizar que el frente de ataque o coeficiente aerodinámico del vehículo sea el mismo durante todas las pruebas, para finalmente desplazarse al sitio de realización de recorridos y registro de datos.

Al llegar al sector de carretera seleccionado se verifican las condiciones de operación del tránsito a flujo libre, las del vehículo como la presión de inflado de las llantas, y de los equipos instalados (instrumentación), y así poder iniciar los recorridos del sector vial según el programa elaborado (diseño factorial 3^K ó 2^K). Cada vez se inicia el recorrido

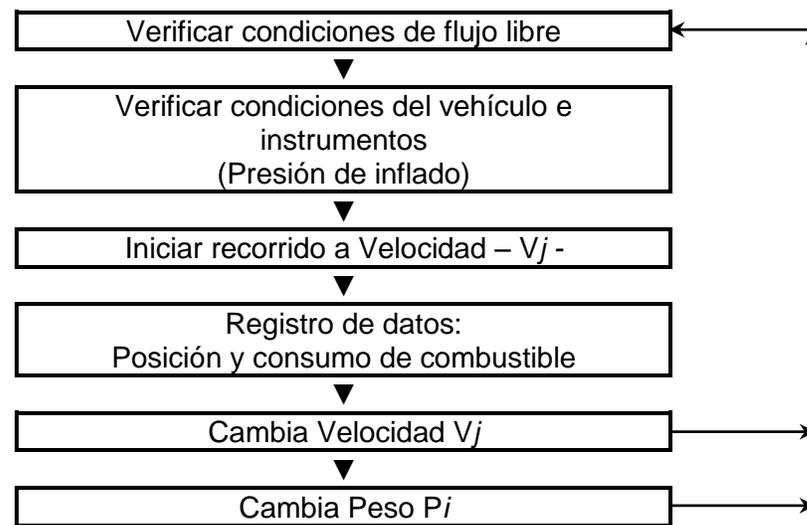
hasta lograr condiciones estables de circulación a determinada velocidad (definida en el diseño factorial), procediendo entonces a garantizar dicha velocidad a lo largo del sector vial hasta llegar nuevamente al sitio de inicio donde se inicia un nuevo recorrido a velocidad diferente según el programa de trabajo; mientras se hacen los recorridos se verifica con el velocímetro del camión y el GPS externo que la velocidad de operación sea la requerida, también se verifican condiciones ambientales pues el caso de lluvias especialmente puede afectar la prueba ya que la fricción rueda-pavimento cambia, la temperatura ambiente y la velocidad del viento son diferentes y por consiguiente afectan el consumo de combustible, en caso de que esto suceda debe suspenderse el recorrido y reiniciarlo una vez las condiciones sean las normales de las pruebas. Es importante hacer registro de información como eventos y hora de ocurrencia por que luego pueden ser la explicación a situaciones que se encuentren en la etapa de procesamiento y análisis de información.

Cuando se terminen las pruebas con un determinado nivel de peso se debe proceder al cambio del mismo según el diseño factorial, aprovechando esta suspensión de registro de datos para realizar revisiones más detalladas al camión e instrumentos, y descargar y guardar la información de los equipos de la instrumentación.

Teniendo el vehículo con el nuevo peso se reinicia el proceso dirigiéndose al sector vial para proceder de la misma manera anterior.

En la Figura 20 se ilustra de manera resumida el proceso una vez se está en el sector de carretera previo al inicio de los recorridos.

Figura 20. Proceso para la realización de recorridos para cada peso P_i



Fuente: Elaboración propia

Durante la realización de las pruebas se debe tener control de la velocidad del motor (revoluciones por minuto) de tal manera que el vehículo esté en régimen adecuado de uso; pues el efecto de motores inadecuadamente revolucionados afecta el consumo de combustible, aspecto conocido como *acceleration noise* y sobre el cual se han hecho

algunas investigaciones (Greenwood, 2003). De igual manera para condiciones similares de operación la marcha del camión debe ser en la misma relación de caja (conocido como cambio de la caja de velocidades) y en posición constante del pedal del acelerador. Estas situaciones son posibles con conductor y técnicas de conducción adecuadas, por lo que para las pruebas los conductores deben ser experimentados y ser el mismo para cada tipo de camión, es decir que no se debe hacer cambio de conductor para el mismo vehículo.

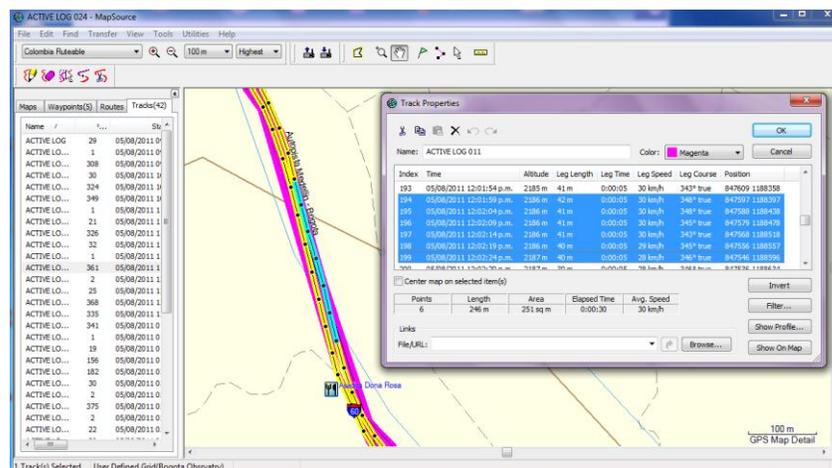
5.3 PROCESAMIENTO DE INFORMACIÓN

La información obtenida se debe correlacionar de tal manera que se tenga el consumo de combustible en los sectores viales de interés, para ello es necesario consultar la información de un recorrido en particular que se haya realizado a la velocidad deseada según la programación de las pruebas definidas en los diseños factoriales (como es el caso de las Tabla 13 y Tabla 14 para el vehículo C3S3), así por ejemplo según la Tabla 13 se analiza el recorrido del orden 1 para el caso de vehículo totalmente cargado que hace el recorrido a 35km/h identificando el sector vial que tiene pendiente del 7%.

La información a correlacionar es, para un determinado recorrido (orden en el diseño factorial), el posicionamiento y consumo, verificando en cada caso que la velocidad corresponda a la requerida.

- Posicionamiento: se trata de identificar el período de tiempo (hora) en el cual el vehículo recorre cada uno de los sectores viales de interés, esto es posible al consultar la base de datos del GPS externo sobre su mapa actualizado, una muestra de imagen que ilustra esto se presenta en la Figura 21. Esta información puede verificarse comparándola con los registros del GPS interno del computador de abordo.

Figura 21. Imagen de mapa y registro del GPS externo.



Fuente: Elaboración propia

- Consumo de combustible: conocido el lapso de tiempo en el cual se ha recorrido el sector de interés (información previa consultada del GPS), se consulta en la base de datos del computador de abordo el consumo de combustible correspondiente a dicho lapso de tiempo, así las unidades de este consumo son ml/s, que luego se afecta por la velocidad respectiva para obtener dicho consumo en unidades ml/km. Es decir $[ml/s][s/km]=[ml/km]$.

Con respecto a la velocidad es importante mencionar que normalmente la obtenida en el recorrido no es exactamente igual a la deseada según el diseño del experimento, por lo que se considera aceptable su valor si no difieren, por exceso o defecto, en más de 2.5km/h que corresponde a diferencia entre 10% (para 25km/h) y 3.6% (para 70km/h), que se consideran aceptables a juicio práctico del experimentador y que además no permite solape entre las diferentes velocidades contempladas en la investigación.

Al obtener los datos de consumo requeridos, para cada uno de los diseños factoriales se procede a la validación de dichos datos con análisis estadísticos identificándose de esta manera datos “extraños”, fuera de rango u otra condición que hacen necesaria su revisión procediendo a verificarlos con las bases de datos respectivas; se pueden encontrar valores no adecuados por diversos factores especialmente de tipo humano como son lecturas inadecuadas, imprecisas o definitivamente equivocadas por el manejo de las bases de datos, así también como el registro o anotación de dichos valores en los formatos de los diseños factoriales. De forma muy esporádica puede suceder que el dato no es válido por que la velocidad del vehículo no es adecuada, en este caso se procede a consultar otro de los recorridos hechos a la velocidad requerida pero cuyo objetivo era un sector vial diferente (otra pendiente) por que si es el mismo sector se estaría duplicando la información y esto no es válido, por ejemplo al considerar la Tabla 13 si el dato de velocidad para el orden 1 (pendiente 7%) no es adecuado se puede obtener el registro del recorrido orden 5 que es para sector con pendiente 5.2% pero en este caso también se observaría para el sector con pendiente 7%; esta última situación no afecta los resultados ya que de todas maneras se mantiene la aleatoriedad del orden de las pruebas, además esto no debe ser frecuente porque entonces se invalidan las pruebas.

La identificación de dichos valores “extraños” es posible dada la aplicación del concepto de réplica que se indica en el numeral 5.1 (Diseño del experimento), pues sin ellas no es posible detectar situaciones indeseadas en los datos.

6. DATOS OBTENIDOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se presentan los datos obtenidos en las pruebas de campo para cada uno de los vehículos y diseños experimentales definidos previamente, y luego de hacer el respectivo procesamiento de dicha información recolectada, haciendo los correctivos según lo indicado en el numeral 5.3, por lo que solo se muestran los datos debidamente depurados que serán objeto de análisis.

Posteriormente se presenta el análisis de estos datos con lo que se logra la validación de los mismos y la identificación del comportamiento del consumo de combustible según los factores o parámetros considerados, pudiendo de esta manera identificar un modelo matemático que relacione estas variables.

Por último se hace comparación de los resultados obtenidos en esta investigación con los que se pueden lograr al utilizar el modelo de consumo de combustible del HDM-4, modelo elegido según lo expuesto en el capítulo 3.

6.1 DATOS OBTENIDOS

Los datos obtenidos en los trabajos de campo de acuerdo con los diseños experimentales y las variables con sus niveles definidos, se presentan en las Tabla 17 y Tabla 18 para los diseños factoriales 3^K de camiones C3S3 y C3 respectivamente. Estos datos son utilizados para analizar el consumo de combustible (ml/km) de los camiones considerados según el peso total del vehículo (tara o peso vacío mas la cantidad de carga), la pendiente del tramo o sector vial y la velocidad de operación del vehículo.

La forma como se muestran los datos en las Tabla 17 y Tabla 18 en términos de la cantidad de cifras significativas o decimales es reflejo de la precisión con la que se manipulan los respectivos factores, y acorde con las unidades de medida de común uso; así el peso del vehículo se expresa en toneladas (t), la pendiente longitudinal del tramo o sector vial en porcentaje (%), la velocidad en kilómetros por hora (km/h) y el consumo en mililitros por kilómetro (ml/km), aunque en este último caso algunos utilizan l/100km o gl/km o km/gl que es usual en particular para algunos transportadores; el cambio de unidades en cualquiera de las situaciones no es un proceso complejo por lo que cualquier lector podrá hacerlas según su conveniencia.

Los datos obtenidos acorde con el diseño factorial 2^K , en forma similar a los presentados previamente para el factorial 3^K , se muestran en las Tabla 19 y Tabla 20 para los camiones C3S3 y C3 respectivamente manteniendo las unidades en las que expresan cada una de los factores.

La forma de presentación de estos datos es clara de entender y facilita el posterior análisis de los mismos.

Tabla 17. Datos obtenidos en pruebas de campo – Factorial 3^K – Camión C3S3

Orden	Peso (t)	Pendiente (%)	Velocidad (km/h)	Consumo (ml/km)	Orden	Peso (t)	Pendiente (%)	Velocidad (km/h)	Consumo (ml/km)
1	51.95	7.0	35	2243.08	42	26.28	5.2	30	1149.79
2	51.95	5.2	25	2224.67	43	26.28	5.2	30	1149.79
3	51.95	2.0	30	691.63	44	26.28	5.2	35	1202.51
4	51.95	7.0	30	2289.23	45	26.28	2.0	25	338.02
5	51.95	5.2	35	2133.33	46	26.28	7.0	25	1158.26
6	51.95	5.2	35	2088.53	47	26.28	5.2	25	1152.00
7	51.95	7.0	25	2215.38	48	26.28	5.2	25	1148.50
8	51.95	2.0	35	601.92	49	26.28	7.0	35	1142.14
9	51.95	7.0	25	2186.06	50	26.28	7.0	25	1174.97
10	51.95	2.0	30	683.72	51	26.28	5.2	35	1180.14
11	51.95	7.0	35	2210.49	52	26.28	5.2	25	1127.75
12	51.95	7.0	30	2271.60	53	26.28	2.0	25	365.24
13	51.95	7.0	35	2250.55	54	26.28	7.0	30	1165.26
14	51.95	5.2	30	2161.16	55	19.09	7.0	25	779.31
15	51.95	2.0	30	649.18	56	19.09	2.0	25	249.60
16	51.95	2.0	35	652.33	57	19.09	2.0	30	260.68
17	51.95	7.0	25	2248.72	58	19.09	5.2	35	749.19
18	51.95	2.0	35	610.89	59	19.09	5.2	30	772.99
19	51.95	2.0	25	588.10	60	19.09	2.0	25	250.79
20	51.95	5.2	35	2120.33	61	19.09	5.2	25	758.73
21	51.95	5.2	30	2164.61	62	19.09	2.0	30	261.92
22	51.95	2.0	25	600.66	63	19.09	2.0	35	250.85
23	51.95	5.2	30	2169.60	64	19.09	7.0	30	809.30
24	51.95	5.2	25	2232.00	65	19.09	5.2	35	787.76
25	51.95	2.0	25	640.85	66	19.09	2.0	25	246.92
26	51.95	7.0	30	2328.78	67	19.09	7.0	35	842.59
27	51.95	5.2	25	2178.72	68	19.09	5.2	30	740.79
28	26.28	2.0	30	367.54	69	19.09	2.0	35	233.65
29	26.28	7.0	35	1150.05	70	19.09	5.2	30	769.30
30	26.28	7.0	30	1169.01	71	19.09	2.0	35	233.88
31	26.28	5.2	35	1154.03	72	19.09	5.2	35	792.26
32	26.28	2.0	35	305.35	73	19.09	5.2	25	789.94
33	26.28	2.0	25	318.00	74	19.09	7.0	25	785.33
34	26.28	5.2	30	1153.16	75	19.09	2.0	30	220.62
35	26.28	2.0	35	316.82	76	19.09	7.0	35	868.11
36	26.28	7.0	35	1152.60	77	19.09	7.0	30	830.86
37	26.28	2.0	30	399.26	78	19.09	7.0	25	819.36
38	26.28	7.0	30	1200.00	79	19.09	7.0	35	828.00
39	26.28	2.0	30	399.26	80	19.09	5.2	25	795.71
40	26.28	2.0	35	321.16	81	19.09	7.0	30	843.43
41	26.28	7.0	25	1200.00					

Fuente: Elaboración propia

Tabla 18. Datos obtenidos en pruebas de campo – Factorial 3^K – Camión C3

Orden	Peso (t)	Pendiente (%)	Velocidad (km/h)	Consumo (ml/km)	Orden	Peso (t)	Pendiente (%)	Velocidad (km/h)	Consumo (ml/km)
1	27.99	7.0	35	1316.64	42	17.18	5.2	35	882.61
2	27.99	5.2	25	1363.59	43	17.18	5.2	35	882.61
3	27.99	2.0	35	558.64	44	17.18	5.2	45	864.06
4	27.99	7.0	35	1345.03	45	17.18	2.0	25	376.71
5	27.99	5.2	45	1252.65	46	17.18	7.0	25	923.36
6	27.99	5.2	45	1252.65	47	17.18	5.2	25	917.19
7	27.99	7.0	25	1368.70	48	17.18	5.2	25	917.19
8	27.99	2.0	45	524.43	49	17.18	7.0	45	809.55
9	27.99	7.0	25	1349.49	50	17.18	7.0	25	954.00
10	27.99	2.0	35	542.51	51	17.18	5.2	45	832.26
11	27.99	7.0	45	1273.05	52	17.18	5.2	25	891.47
12	27.99	7.0	35	1325.79	53	17.18	2.0	25	376.20
13	27.99	7.0	45	1271.74	54	17.18	7.0	35	852.19
14	27.99	5.2	35	1299.09	55	11.72	7.0	25	661.58
15	27.99	2.0	35	547.80	56	11.72	2.0	25	286.82
16	27.99	2.0	45	509.87	57	11.72	2.0	35	267.13
17	27.99	7.0	25	1390.55	58	11.72	5.2	45	619.66
18	27.99	2.0	45	483.59	59	11.72	5.2	35	550.04
19	27.99	2.0	25	564.71	60	11.72	2.0	25	256.29
20	27.99	5.2	45	1228.04	61	11.72	5.2	25	603.36
21	27.99	5.2	35	1264.86	62	11.72	2.0	35	246.58
22	27.99	2.0	25	564.48	63	11.72	2.0	45	221.71
23	27.99	5.2	35	1288.85	64	11.72	7.0	35	561.80
24	27.99	5.2	25	1370.16	65	11.72	5.2	45	617.33
25	27.99	2.0	25	592.62	66	11.72	2.0	25	252.98
26	27.99	7.0	45	1273.85	67	11.72	7.0	45	597.91
27	27.99	5.2	25	1381.82	68	11.72	5.2	35	562.19
28	17.18	2.0	35	334.06	69	11.72	2.0	45	216.32
29	17.18	7.0	45	820.80	70	11.72	5.2	35	541.07
30	17.18	7.0	35	871.99	71	11.72	2.0	45	208.44
31	17.18	5.2	45	829.10	72	11.72	5.2	45	587.49
32	17.18	2.0	45	347.26	73	11.72	5.2	25	613.44
33	17.18	2.0	25	355.11	74	11.72	7.0	25	663.38
34	17.18	5.2	35	869.14	75	11.72	2.0	35	240.00
35	17.18	2.0	45	364.82	76	11.72	7.0	45	573.45
36	17.18	7.0	45	828.33	77	11.72	7.0	35	587.38
37	17.18	2.0	35	328.45	78	11.72	7.0	25	633.87
38	17.18	7.0	35	842.85	79	11.72	7.0	45	606.74
39	17.18	2.0	35	328.45	80	11.72	5.2	25	612.55
40	17.18	2.0	45	345.41	81	11.72	7.0	35	595.63
41	17.18	7.0	25	950.84					

Fuente: Elaboración propia

Tabla 19. Datos obtenidos en pruebas de campo – Factorial 2^K – Camión C3S3

Orden	Peso (t)	Pendiente (%)	Velocidad (km/h)	Consumo (ml/km)	Orden	Peso (t)	Pendiente (%)	Velocidad (km/h)	Consumo (ml/km)
1	51.95	0.6	40	445.91	13	19.09	0.60	40	194.38
2	51.95	0.6	60	515.38	14	19.09	2.00	40	279.34
3	51.95	2.0	60	734.40	15	19.09	0.60	40	194.38
4	51.95	2.0	40	649.69	16	19.09	0.60	60	195.85
5	51.95	0.6	60	508.06	17	19.09	0.60	60	195.85
6	51.95	2.0	40	659.73	18	19.09	0.60	40	219.73
7	51.95	0.6	40	469.27	19	19.09	0.60	60	196.64
8	51.95	0.6	60	518.40	20	19.09	2.00	60	301.82
9	51.95	2.0	60	718.60	21	19.09	2.00	60	301.82
10	51.95	0.6	40	452.38	22	19.09	2.00	40	279.34
11	51.95	2.0	40	678.93	23	19.09	2.00	40	307.36
12	51.95	2.0	60	726.65	24	19.09	2.00	60	280.78

Fuente: Elaboración propia

Tabla 20. Datos obtenidos en pruebas de campo – Factorial 2^K – Camión C3

Orden	Peso (t)	Pendiente (%)	Velocidad (km/h)	Consumo (ml/km)	Orden	Peso (t)	Pendiente (%)	Velocidad (km/h)	Consumo (ml/km)
1	27.99	2.0	70	614.35	13	11.72	0.60	50	204.14
2	27.99	0.6	50	346.15	14	11.72	2.00	50	285.26
3	27.99	0.6	70	299.53	15	11.72	0.60	50	204.14
4	27.99	2.0	70	611.30	16	11.72	0.60	70	218.50
5	27.99	2.0	50	581.25	17	11.72	0.60	70	218.50
6	27.99	0.6	70	298.80	18	11.72	0.60	50	199.76
7	27.99	2.0	50	566.95	19	11.72	0.60	70	206.00
8	27.99	0.6	50	342.86	20	11.72	2.00	70	298.63
9	27.99	0.6	70	313.89	21	11.72	2.00	70	298.63
10	27.99	2.0	70	598.58	22	11.72	2.00	50	280.31
11	27.99	0.6	50	337.05	23	11.72	2.00	50	290.10
12	27.99	2.0	50	573.90	24	11.72	2.00	70	300.00

Fuente: Elaboración propia

6.2 ANÁLISIS DE DATOS

Las herramientas estadísticas utilizadas para analizar los datos que resultan de un experimento son ampliamente conocidas y muchas de ellas se basan en el análisis de varianza y en la regresión múltiple o modelo lineal general aunque también, y de manera más amplia, en los modelos lineales generalizados (Salazar y Baena, 2009).

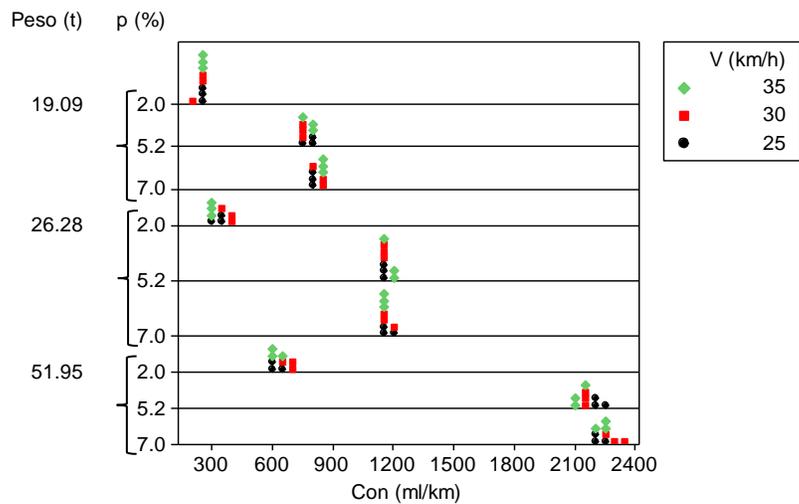
El programa computacional o *software* llamado *Minitab*® es referenciado en la literatura como adecuado para análisis estadísticos de diversos tipos incluidos los diseños de experimentos tipo factorial (Gutiérrez y de la Vara, 2008), como los utilizados en esta investigación, por lo que se usa este programa en su versión 16 para obtener resultados

de análisis estadísticos con base en los cuales se puedan validar los datos encontrados, identificar la relación entre los factores estudiados mediante análisis de regresión para obtener un modelo matemático que las correlacione, y de igual manera determinar la validez de dicho modelo para explicar el comportamiento de los datos y predecir resultados para niveles de los factores diferentes a aquellos con los cuales se obtiene.

A continuación se presentan los resultados y el análisis de los datos obtenidos en los trabajos de campo, de acuerdo con el diseño de experimentos programado, para cada uno de los camiones y factoriales respectivos. Primero se presenta lo correspondiente al camión C3S3 para el factorial 3^K haciendo explicación de cada análisis y resultado obtenido, posteriormente lo correspondiente al caso del factorial 2^K del mismo camión; para a continuación hacer lo respectivo para el camión C3 y sus factoriales 3^K y 2^K .

6.2.1 Camión C3S3 - Factorial 3^K . En la Figura 22 se ilustra el comportamiento de los datos de consumo de combustible –Con (ml/km)-, en los que para cada uno de los tres (3) niveles de carga –Peso (t)- hay 27 datos, correspondiendo 9 (nueve) a cada uno de los niveles de pendiente –p (%)- siendo tres (3) para cada nivel de velocidad –V (km/h)-.

Figura 22. Gráfica de puntos – Factorial 3^K – Camión C3S3



Fuente: Elaboración propia usando *Minitab®*

De acuerdo a lo que se observa en la Figura 22 se identifica tendencia de aumento en el consumo de combustible cuando se incrementan el peso, pendiente y velocidad, en forma individual y al combinar estas variables, siendo más notorio este incremento para altos valores de peso y pendiente. Así por ejemplo los rangos de variación del consumo para pendiente entre 2% y 7% y velocidad entre 25km/h y 35km/h es de 600ml/km, 900ml/km y 1600ml/km para pesos de 19.09t, 26.28t y 51.95t respectivamente, mostrando esto que no se tienen linealidad en los cambios respectivos. El efecto de la velocidad no es apreciable para estos niveles de pendiente y peso, aspecto que se aborda en detalle posteriormente.

En la Tabla 21 se presentan los resultados del análisis de varianza (ANOVA) para esta situación de experimentación.

Tabla 21. Resultados ANOVA – Factorial 3^K – Camión C3S3

Fuente	GL	SC Sec.	SC Ajust.	MC Ajust.	F	P
Peso (t)	2	16619006	16619006	8309503	19802.67	0.000
p (%)	2	17301019	17301019	8650510	20615.34	0.000
V (km/h)	2	8569	8569	4284	10.21	0.000
Peso (t)*p (%)	4	3368506	3368506	842126	2006.90	0.000
Peso (t)*V (km/h)	4	9206	9206	2302	5.48	0.001
p (%)*V (km/h)	4	11192	11192	2798	6.67	0.000
Peso (t)*p (%)*V (km/h)	8	20443	20443	2555	6.09	0.000
Error	54	22659	22659	420		
Total	80	37360600				

GL=Grados de libertad; SC=Suma de cuadrados; MC=Media de cuadrados=SC/GL

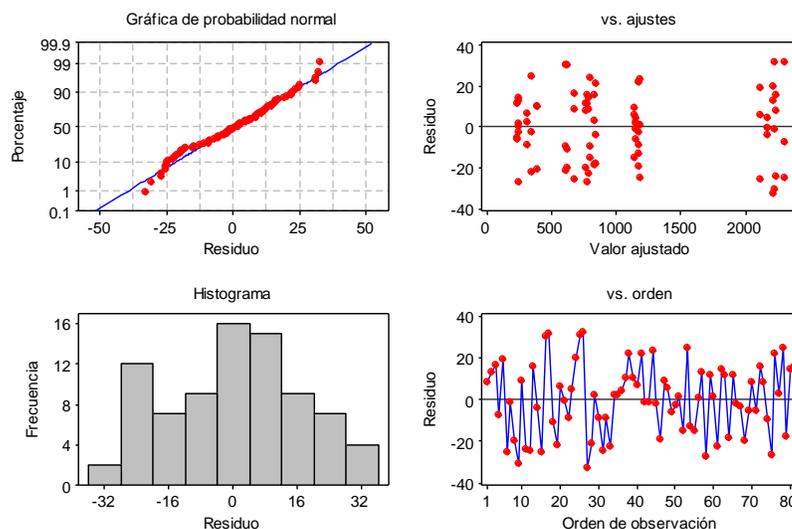
R² = 99.94% R² ajustado = 99.91%

Fuente: Elaboración propia

Con base en los resultados del análisis estadístico que se muestran en la Tabla 21 se puede identificar que los factores considerados, y sus interacciones son significativas, ya que el valor P es menor a 0.05 en todos los casos; y que no hay términos innecesarios en vista de la similitud que presentan R² y R² ajustado. Por lo que para el modelo que se desea encontrar deben considerarse todos los factores y sus interacciones.

Este análisis se complementa con las gráficas de residuos, efectos principales y de interacción que se muestran en las Figura 23, Figura 24 y Figura 25 respectivamente.

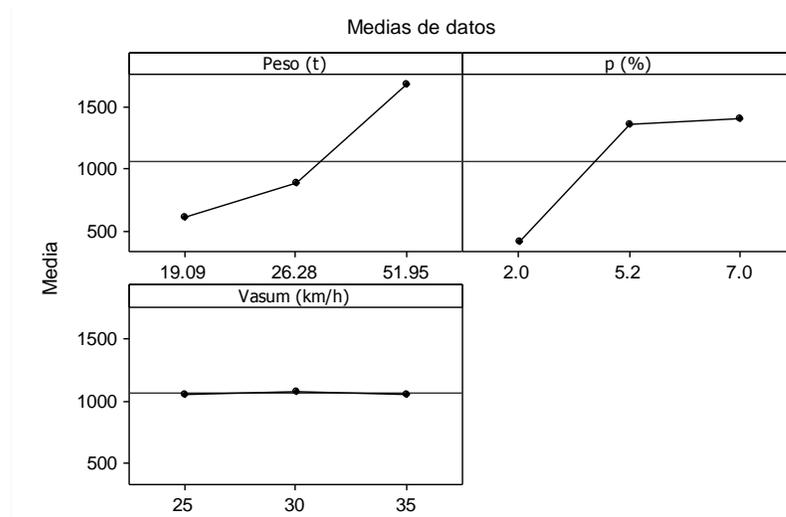
Figura 23. Residuos para consumo – Factorial 3^K – Camión C3S3



Fuente: Elaboración propia usando *Minitab*®

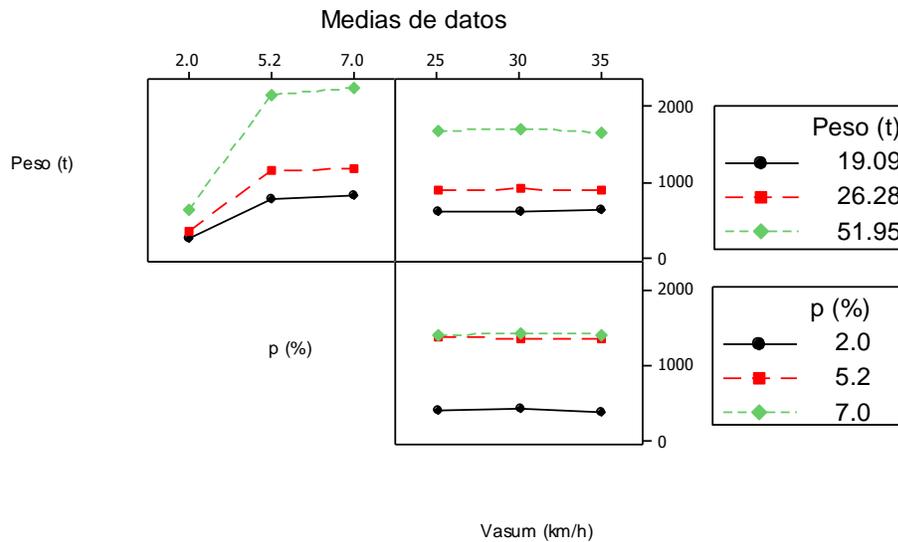
En la Figura 23 se puede observar considerando los residuos que hay adecuada distribución de los mismos según la gráfica de probabilidad normal y el histograma de frecuencia, presentan buena dispersión con respecto a cero (0) y tienen independencia temporal dada su comportamiento aleatorio según el orden de la observación; por lo que se confirma la validez estadística de los datos considerados en el análisis.

Figura 24. Efectos principales para consumo – Factorial 3^K – Camión C3S3



Fuente: Elaboración propia usando *Minitab*®

Figura 25. Interacción para consumo – Factorial 3^K – Camión C3S3



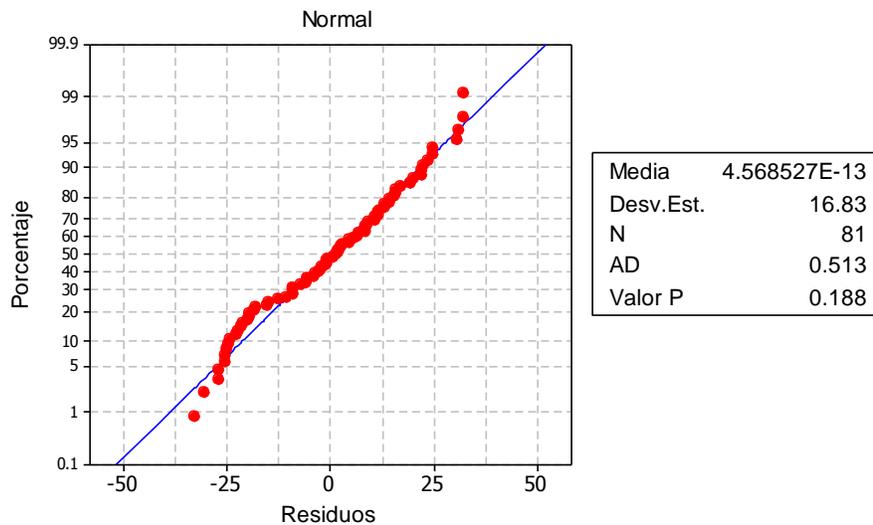
Fuente: Elaboración propia usando *Minitab*®

El comportamiento del consumo de combustible de acuerdo con lo que se puede observar en la Figura 24 y la Figura 25 es lo esperado ya que se evidencia incremento del mismo

según aumentan el peso y la pendiente, para el caso de la velocidad este comportamiento no es visible y la explicación a esto se debe al rango de velocidades en el cual se hacen las pruebas, en este sentido se puede observar según los modelos existentes que se ilustran en la Figura 1 y la Figura 3 que en este rango de velocidad no hay diferencia apreciable en el consumo de combustible por lo que este resultado no es sorprendente.

En la Figura 26 se muestra la prueba de normalidad de la distribución de los residuos en la que se puede observar, por su comportamiento y los resultados numéricos, que tienen distribución normal, dado que los puntos se ajustan a la línea recta, su media es prácticamente cero (0) y el valor P es mayor a 0.05 con lo que no se rechaza la hipótesis de que los datos son normales, por lo que se confirma que los datos y resultados son válidos desde el punto de vista estadístico con un nivel de confianza del 95%.

Figura 26. Probabilidad de residuos – Distribución normal - Factorial 3^K – Camión C3S3

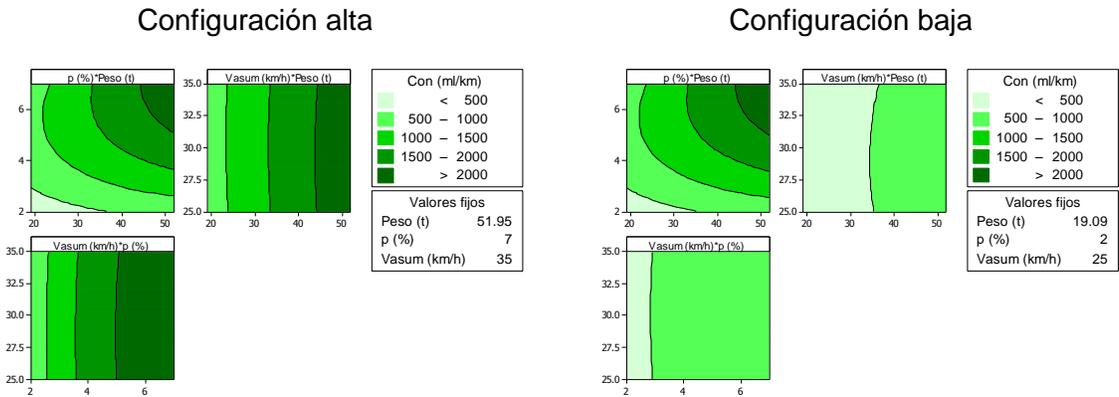


Fuente: Elaboración propia usando *Minitab*®

Adicional a lo anterior se presentan en las Figura 27 y Figura 28 las gráficas de contorno y superficie de respuesta para configuraciones alta y baja de los factores, es decir los valores mayores y menores de los factores peso, pendiente y velocidad.

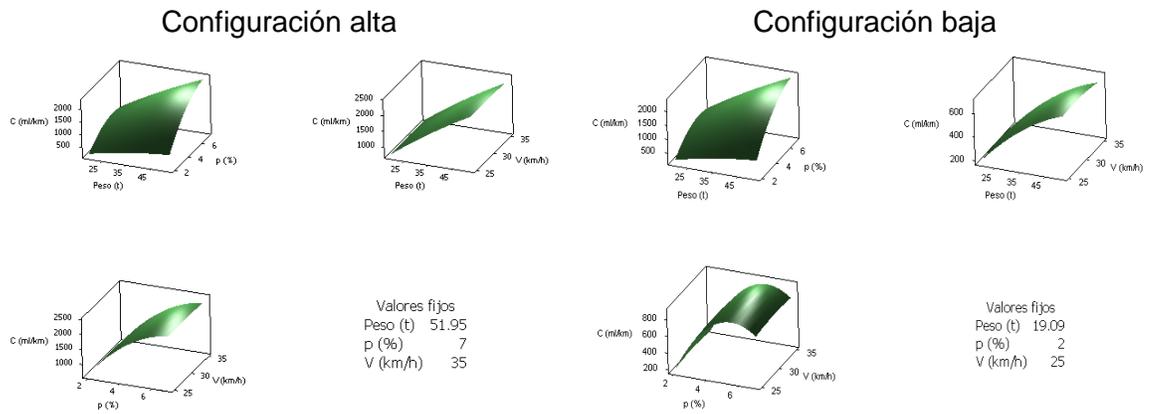
Se puede ver en ellas la similitud de comportamientos y se evidencia el efecto de curvatura especialmente para el caso de peso y pendiente, pues para la velocidad no lo es así por lo expresado anteriormente con respecto a los niveles de estudio. Para entender un poco mejor esta situación se puede considerar la gráfica del extremo superior izquierdo de la Figura 27 en la que las abscisas corresponden al peso del vehículo y las ordenadas a la pendiente de la carretera, pudiéndose ver al interior para alguna combinación peso-pendiente el respectivo consumo de combustible; colores claros corresponden a consumos bajos y colores oscuros a consumos altos; se observa como los consumos se elevan a mayores peso y pendiente, y como al incrementar la pendiente y más alta sea los consumos aumentan más rápido con el peso, lo que se corresponde con el efecto curvatura mencionado previamente.

Figura 27. Gráfica de contorno – Factorial 3^K – Camión C3S3



Fuente: Elaboración propia usando *Minitab*®

Figura 28. Superficie de respuesta – Factorial 3^K – Camión C3S3



Fuente: Elaboración propia usando *Minitab*®

Visto de otra forma, en la gráfica tridimensional del extremo superior izquierdo de la Figura 28 se observa que el peso del vehículo y la pendiente de la carretera son las de mayor efecto en el consumo y su comportamiento no es lineal como se ha expresado.

Al haber identificado la validez de los datos es viable realizar análisis de regresión general utilizando todos los factores y niveles considerados, obteniendo como resultado un modelo matemático para la estimación del consumo de combustible válido para los factores en estudio y el rango definido por los niveles considerados; Para la regresión se incluyen efectos cuadráticos de los factores y sus interacciones debido a que se espera identificar el efecto de curvatura que se tiene en los modelos existentes, tal como se indica en el diseño del experimento al definir utilizar el factorial 3^K, y además los resultados obtenidos y los análisis realizados a ellos que se han descrito.

El modelo encontrado debe ser revisado para que sus componentes o términos tengan significancia y su ajuste sea válido, y así sea adecuado para los fines previstos. El modelo definitivo para este caso del camión C3S3 se presenta en la ecuación 32.

$$C = -49.3166P + 30.2423V + 20.6906P \cdot p + 0.355453P^2 - 24.9639p^2 - 0.514948V^2 - 0.021823P^2 \cdot p^2 \quad (32)$$

Donde: C = Consumo [ml/km], P = Peso [t], p = Pendiente [%], y V = Velocidad [km/h]

Todos los términos son significativos, de acuerdo con el valor P que valida dicha condición, ya que en todos los casos es cero (0.000)

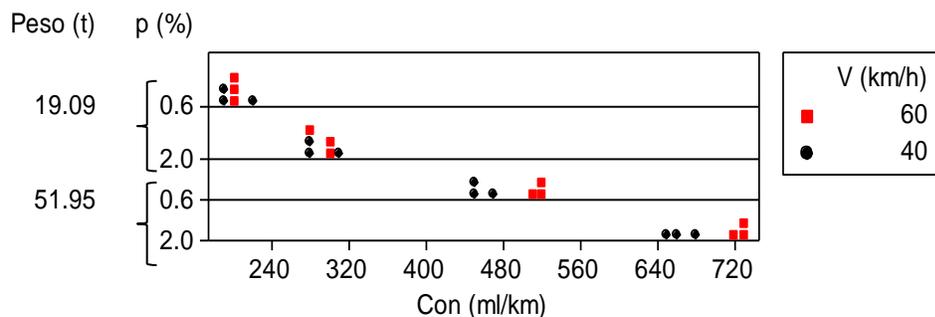
Los estadísticos obtenidos para esta regresión son:

$$R^2 = 99.88\% \quad R^2_{\text{ajustado}} = 99.87\% \quad R^2_{\text{pronosticado}} = 99.86\%$$

Los valores obtenidos de R^2 y R^2_{ajustado} muestran la validez del modelo para representar los datos conocidos. El estadístico $R^2_{\text{pronosticado}}$ indica en qué grado el modelo pronostica respuestas para observaciones nuevas o diferentes no incluidas en el cálculo del modelo; así, por el resultado obtenido para este indicador se concluye que el modelo encontrado es válido para hacer predicción del consumo de combustible teniendo presente que no es adecuado utilizarlo para valores de los factores por fuera de los niveles establecidos para ellos.

6.2.2 Camión C3S3 - Factorial 2^K . Para este caso, de velocidades más altas, la gráfica de puntos que muestra el comportamiento de los datos se presenta en la Figura 29, y los resultados del análisis ANOVA en la Tabla 22.

Figura 29. Gráfica de puntos – Factorial 2^K – Camión C3S3



Fuente: Elaboración propia usando *Minitab*®

Se observa en la Figura 29 la forma como se incrementa el consumo de combustible cuando se aumenta la pendiente, y especialmente al considerar pesos más altos, situación más notoria al combinar estos parámetros. En este caso es visible que la velocidad tiene efecto en el consumo de combustible, situación no tan notoria en el caso del factorial 3^K que es con velocidades menores.

Tabla 22. Resultados ANOVA – Factorial 2^K – Camión C3S3

Fuente	GL	SC Sec.	SC Ajust.	MC Ajust.	F	P
Efectos principales	3	853094	853094	284365	2105.70	0.000
Peso (t)	1	710738	710738	710738	5262.95	0.000
p (%)	1	136842	136842	136842	1013.30	0.000
V (km/h)	1	5515	5515	5515	40.84	0.000
Peso (t)*p (%)	1	20707	20707	20707	153.33	0.000
Peso (t)*V (km/h)	1	5623	5623	5623	41.63	0.000
p (%)*V (km/h)	1	129	129	129	0.95	0.343
Peso (t)*p (%)*V (km/h)	1	19	19	19	0.14	0.710
Error residual	16	2161	2161	135		
Error puro	16	2161	2161	135		
Total	23	881733				

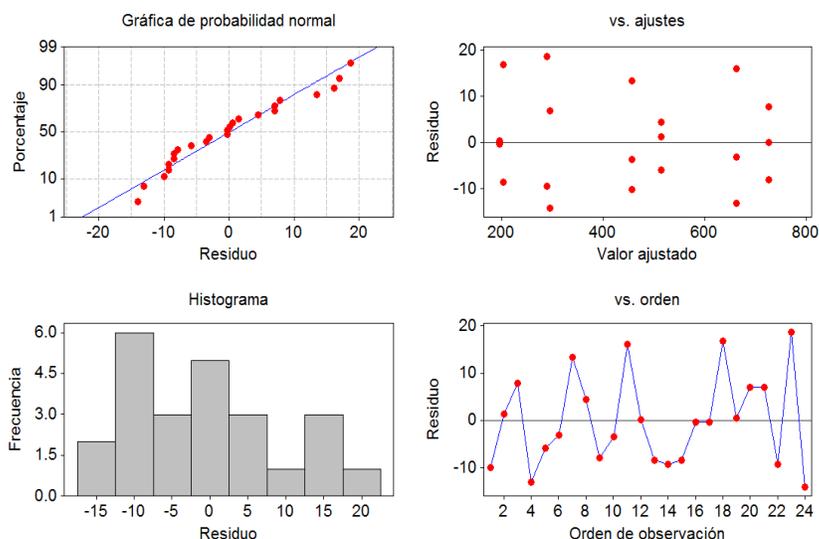
GL=Grados de libertad; SC=Suma de cuadrados; MC=Media de cuadrados=SC/GL
 $R^2 = 99.75\%$ R^2 ajustado = 99.65%

Fuente: Elaboración propia

Los resultados del análisis estadístico mostrado en la Tabla 22 permiten identificar que los factores o efectos principales en forma individual son significativos, como algunas de sus interacciones, y según los R^2 no hay términos innecesarios; sin embargo se decide que para análisis posteriores no se consideran aquellas interacciones que son no significativas como sucede con pendiente-velocidad y peso-pendiente-velocidad.

Las gráficas de residuos, efectos principales y de interacción se muestran en las Figura 30, Figura 31 y Figura 32, respectivamente.

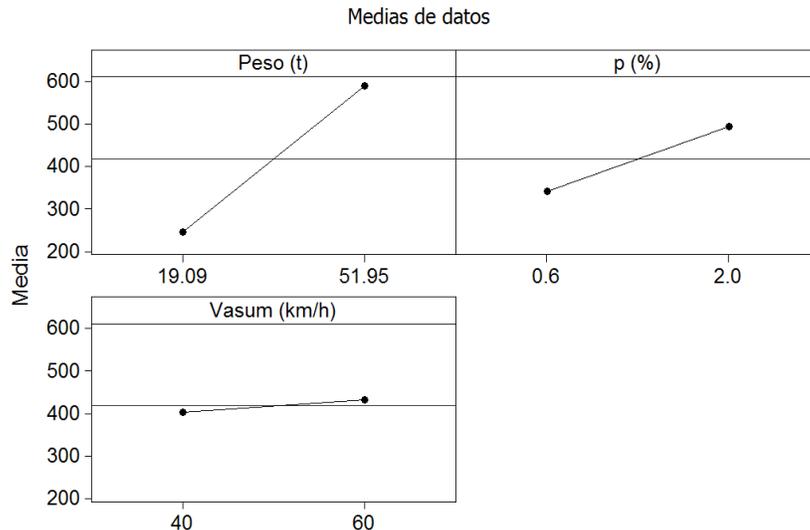
Figura 30. Residuos para consumo – Factorial 2^K – Camión C3S3



Fuente: Elaboración propia usando *Minitab*®

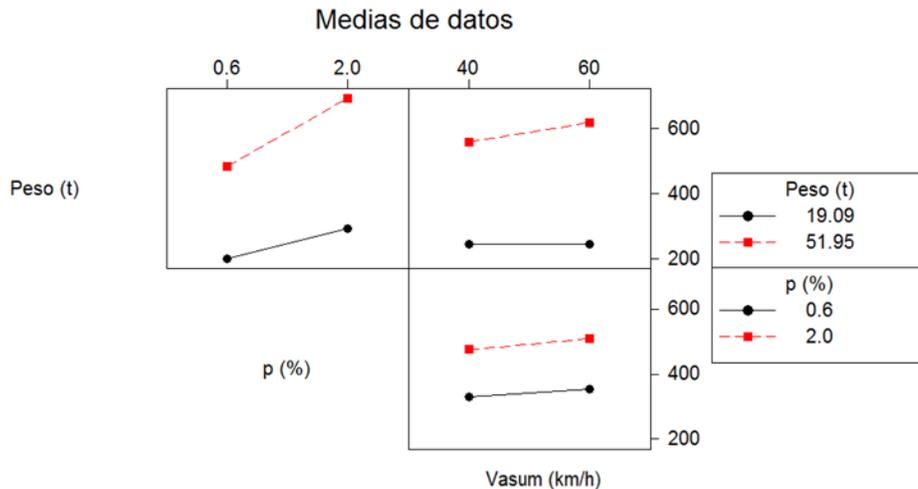
Hay adecuada distribución de los residuos según se observa en la Figura 30 entre otros por la dispersión de los valores ajustados con respecto a cero (0) y la independencia temporal dado su aleatorio comportamiento al contemplar el orden de la observación; confirmándose así la validez estadística de los datos considerados.

Figura 31. Efectos principales para consumo – Factorial 2^k – Camión C3S3



Fuente: Elaboración propia usando *Minitab*®

Figura 32. Interacción para consumo – Factorial 2^k – Camión C3S3

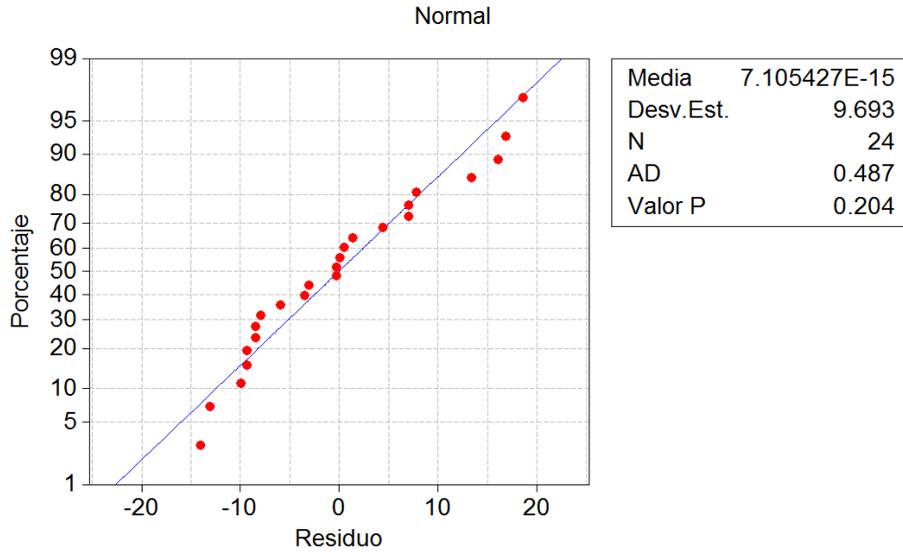


Fuente: Elaboración propia usando *Minitab*®

Lo observado en las Figura 31 y Figura 32 permite identificar comportamiento del consumo de combustible acorde con lo esperado, incluso para el caso de la velocidad a diferencia de lo obtenido para el factorial 3^k , pues en este caso hay evidencia clara de que consumo y velocidad son directamente proporcionales en los niveles de velocidad considerados.

La distribución de los residuos se muestra en la Figura 33 en la que se observa que estos tienen distribución normal, debido a que los datos se ajustan a la línea recta, el valor de la media (casi cero) y P mayor a 0.05, confirmándose que los residuos son normales y por consiguiente que los datos y resultados son válidos con un nivel de confianza del 95%.

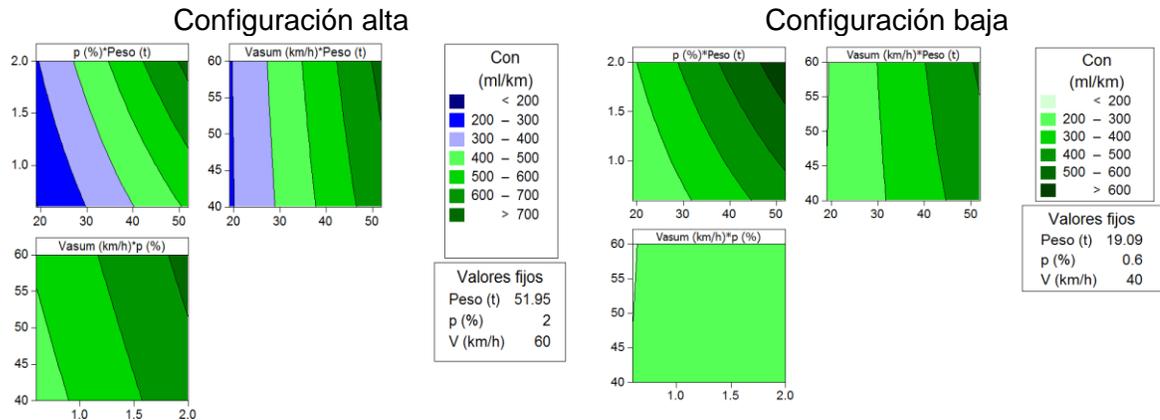
Figura 33. Probabilidad de residuos – Distribución normal - Factorial 2^K – Camión C3S3



Fuente: Elaboración propia usando *Minitab*®

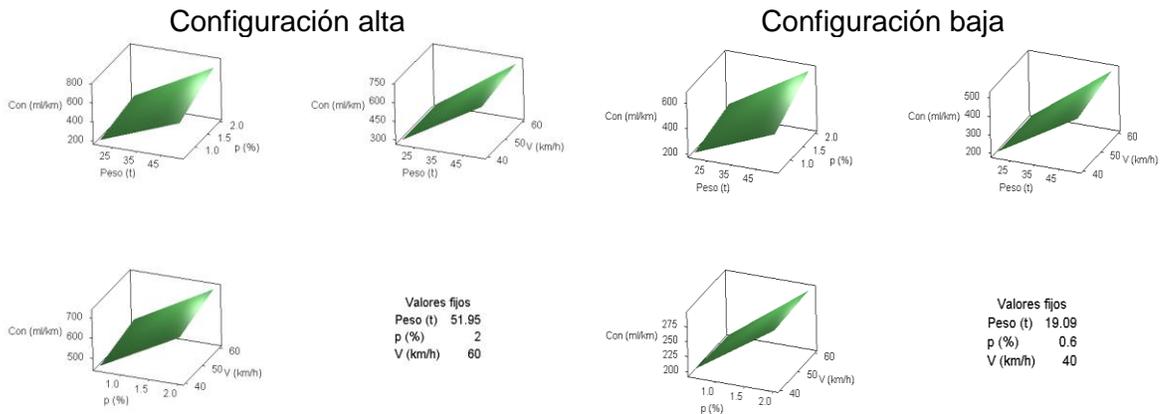
En las Figura 34 y Figura 35 se muestran las gráficas de contorno y superficie de respuesta para los niveles alto y bajo de los factores. Se puede ver en ellas la similitud de comportamientos y se evidencia que el efecto de curvatura es menos evidente que en el caso anterior, lo cual es congruente con lo planteado de que a estos niveles de análisis el comportamiento del consumo de combustible es prácticamente lineal.

Figura 34. Gráfica de contorno – Factorial 2^K – Camión C3S3



Fuente: Elaboración propia usando *Minitab*®

Figura 35. Superficie de respuesta – Factorial 2^K – Camión C3S3



Fuente: Elaboración propia usando *Minitab*®

Por la validez encontrada de los datos, según los análisis estadísticos, se realiza análisis de regresión general utilizando los efectos principales e interacciones, y los datos considerados; el resultado de esta actividad es un modelo matemático (ecuación 33) para la estimación del consumo de combustible que sería válido para los factores y rango establecido por los niveles respectivos considerados. Como se explica para el caso anterior del camión C3S3 en factorial 3^K, se presenta el modelo resultante de analizar las condiciones de significancia de los términos considerados y ajuste del modelo considerado.

$$C = 11.6719P - 1.79316V + 2.9518 P \cdot p + 0.0931592P \cdot V - 0.136448P^2 \quad (33)$$

Donde: C = Consumo [ml/km], P = Peso [t], p = Pendiente [%], y V = Velocidad [km/h]

En este caso el valor P es cero (0.000) para todos los términos, excepto para la velocidad – V – para el que se presenta un valor P de 0.008 que igualmente lo valida como significativo por ser menor a 0.05.

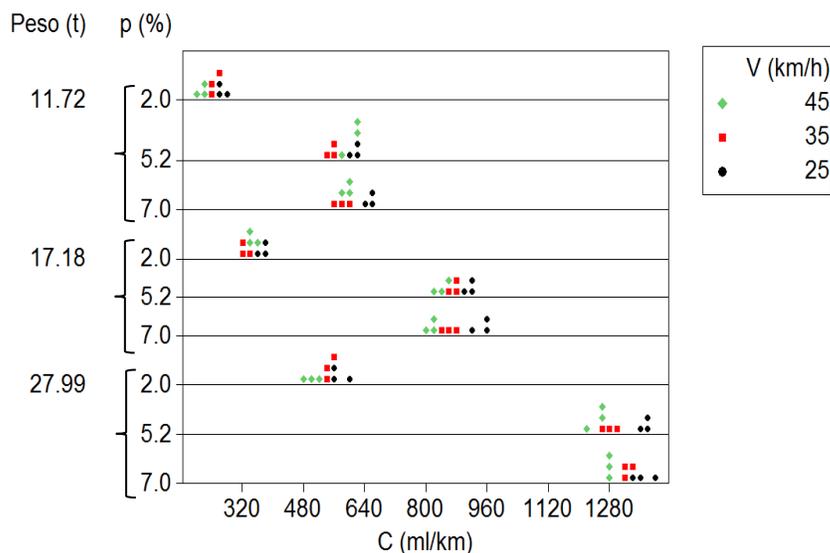
Los estadísticos obtenidos para esta regresión son:

$$R^2 = 99.94\% \quad R^2_{\text{ajustado}} = 99.93\% \quad \text{y} \quad R^2_{\text{pronosticado}} = 99.91\%$$

La validez del modelo para representar los datos conocidos es satisfactoria ya que los valores de R² y R²_{ajustado} son similares; de igual manera el modelo pronostica respuestas, para observaciones nuevas o diferentes no incluidas en el cálculo del modelo, de manera adecuada según lo indica el estadístico R²_{pronosticado} que tienen un valor alto. Por lo anterior el modelo encontrado es válido para hacer predicción del consumo de combustible de acuerdo con los factores considerados y los niveles de estos.

6.2.3 Camión C3 - Factorial 3^K. La Figura 36 muestra el comportamiento general de los datos a analizar, y los resultados del análisis de varianza (ANOVA) para esta situación de experimentación se presentan en la Tabla 23.

Figura 36. Gráfica de puntos – Factorial 3^K – Camión C3



Fuente: Elaboración propia usando *Minitab*®

Tabla 23. Resultados ANOVA – Factorial 3^K – Camión C3

Fuente	GL	SC Sec.	SC Ajust.	MC Ajust.	F	P
Peso (t)	2	4545006	4545006	2272503	11250.48	0.000
p (%)	2	5433495	5433495	2716748	13449.8	0.000
V (km/h)	2	66997	66997	33499	165.84	0.000
Peso (t)*p (%)	4	520755	520755	130189	644.53	0.000
Peso (t)*V (km/h)	4	10396	10396	2599	12.87	0.000
p (%)*V (km/h)	4	6999	6999	1750	8.66	0.000
Peso (t)*p (%)*V (km/h)	8	14943	14943	1868	9.25	0.000
Error	54	10908	10908	202		
Total	80	10609499				

GL=Grados de libertad; SC=Suma de cuadrados; MC=Media de cuadrados=SC/GL

R² = 99.90% R² ajustado = 99.85%

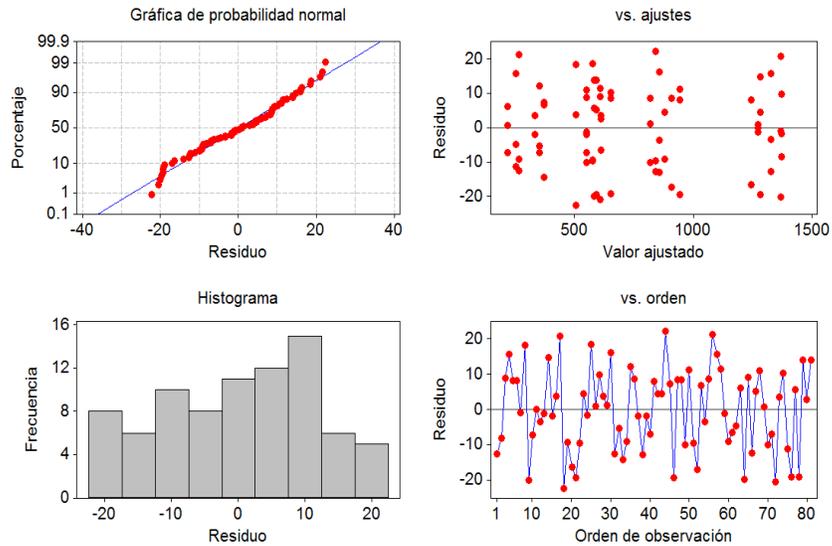
Fuente: Elaboración propia

En la Figura 36 se identifica el aumento en el consumo de combustible cuando el peso, pendiente y velocidad se incrementan, en forma individual y al combinar estos factores, efecto acentuado con niveles altos de estos factores.

Los resultados presentados en la Tabla 23 permiten asegurar que son significativos los factores considerados y sus interacciones, pues el estadístico P es menor a 0.05; la similitud entre R² y R²ajustado hacen que ningún término sea innecesario. Así, todas los factores y sus interacciones son consideradas para el modelo que se desea encontrar.

Con las Figura 37, Figura 38 y Figura 39, en las que se muestran las gráficas de residuos, efectos principales y de interacción respectivamente, se complementa este análisis.

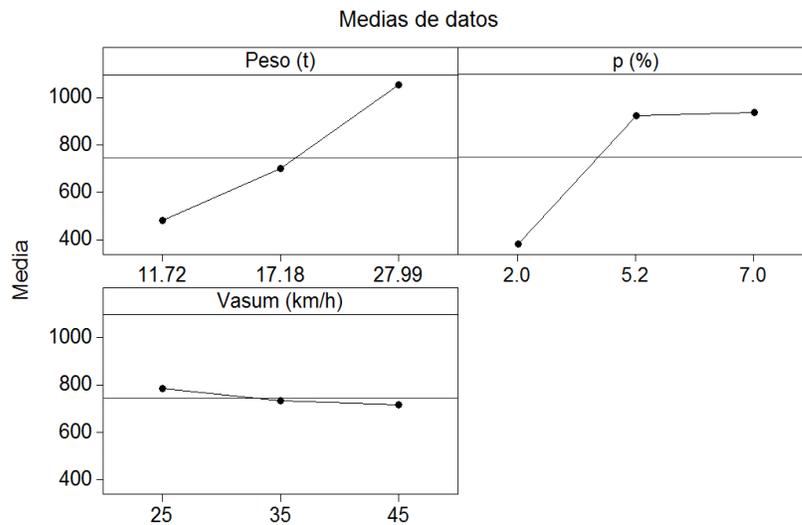
Figura 37. Residuos para consumo – Factorial 3^k – Camión C3



Fuente: Elaboración propia usando *Minitab*®

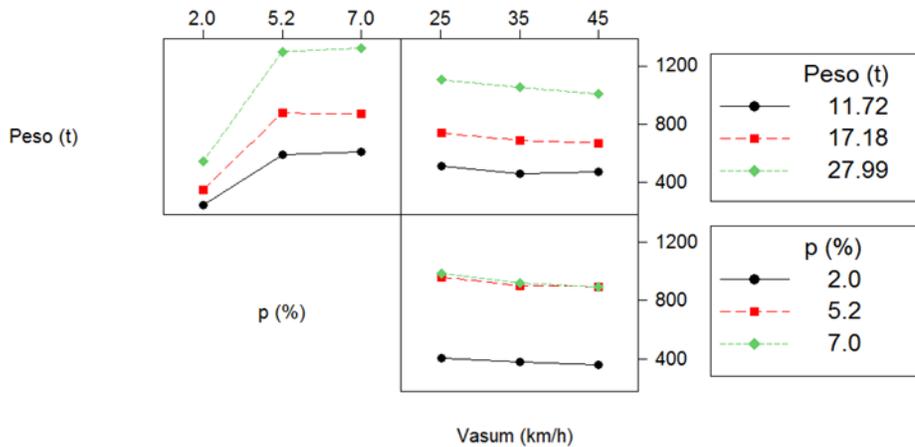
En la Figura 37 se observa que hay adecuada distribución de los residuos según su comportamiento en la gráfica de probabilidad normal, el histograma de frecuencia, la dispersión con respecto a cero (0) y el comportamiento según el orden de la observación; por lo que lo considerado tiene nivel de confianza del 95%, y así validez estadística.

Figura 38. Efectos principales para consumo – Factorial 3^k – Camión C3



Fuente: Elaboración propia usando *Minitab*®

Figura 39. Interacción para consumo – Factorial 3^K – Camión C3
Medias de datos

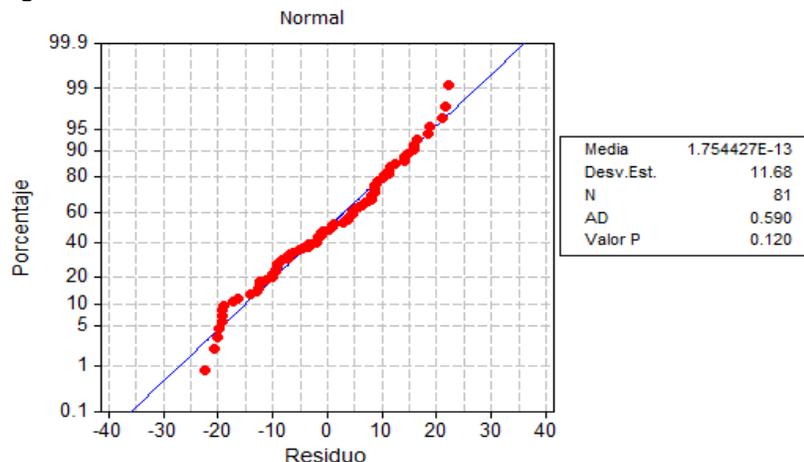


Fuente: Elaboración propia usando *Minitab*®

Al observar las Figura 38 y Figura 39, el comportamiento del consumo de combustible es según lo esperado ya que incrementa según aumentan peso y pendiente, hay disminución del consumo con el incremento de la velocidad, lo que se puede explicar por la mayor potencia del vehículo en comparación relativa con el C3S3, ya que el C3S3 tiene 40% más de cilindrada (15000cc vs. 10800cc) pero capacidad para el doble de carga (33t vs. 16t) y el peso total máximo del vehículo es 1.9 veces superior (52t vs. 28t); por otro lado, según las Figura 1 y Figura 3 es posible que se esté en el costado izquierdo de estas donde el consumo disminuye con el aumento de la velocidad por estar en la parte decreciente de la concavidad de la curva.

La distribución de los residuos se presenta en la Figura 40, en esta se ve que tienen distribución normal, ya que los datos se ajustan a la línea recta, la media es válida y el valor P es mayor a 0.05, lo que confirma que los residuos son normales con un nivel de confianza del 95%.

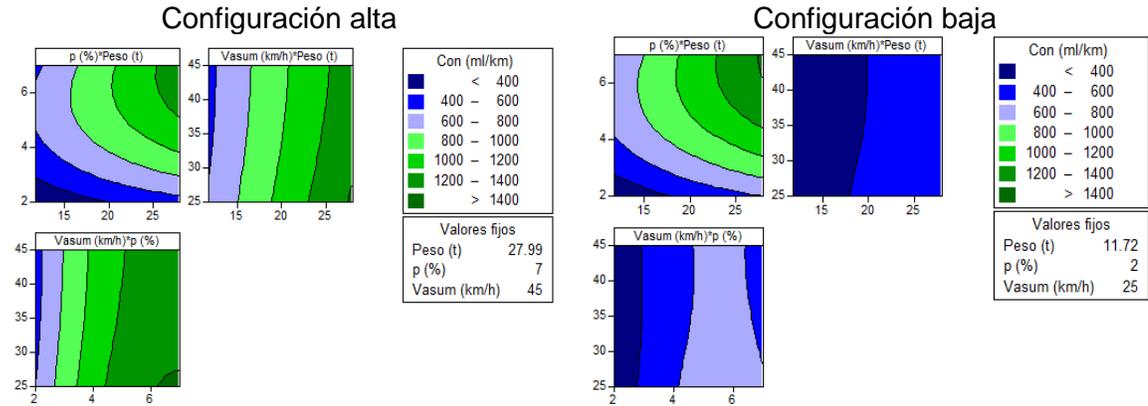
Figura 40. Probabilidad de residuos – Distribución normal - Factorial 3^K – Camión C3



Fuente: Elaboración propia usando *Minitab*®

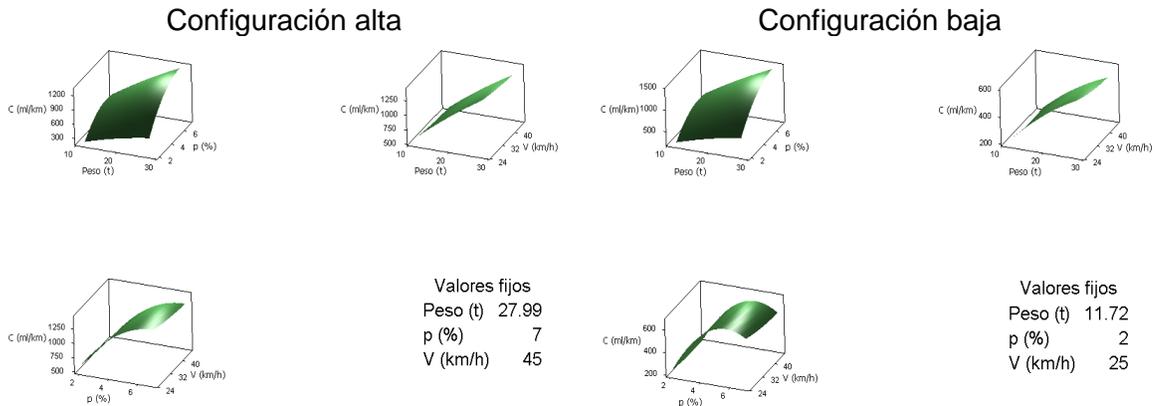
Las graficas de contorno y superficie de respuesta, para configuraciones alta y baja de las variables, se presentan en las Figura 41 y Figura 42, en las que se puede ver similitud de comportamiento y se evidencia el efecto de curvatura para el caso de peso y pendiente.

Figura 41. Gráfica de contorno – Factorial 3^K – Camión C3



Fuente: Elaboración propia usando *Minitab*®

Figura 42. Superficie de respuesta – Factorial 3^K – Camión C3



Fuente: Elaboración propia usando *Minitab*®

Como en los demás casos estudiados es viable, por los resultados y análisis presentados, realizar análisis de regresión general utilizando todos los factores y niveles conocidos, obteniendo un modelo matemático, representado en la ecuación 34, que permite estimar el consumo de combustible acorde con dichos factores y niveles considerados. Se presenta el modelo resultante de efectuar las verificaciones correspondientes a la significancia de los términos y el mismo ajuste del modelo, teniendo presente los factores en forma individual y las interacciones posibles entre ellos.

$$C = -8.00992P + 105.635p - 3.64516V + 15.2035P*p - 20.5096p^2 - 0.0270028P^2*p^2 \quad (34)$$

Donde: C = Consumo [ml/km], P = Peso [t], p = Pendiente [%], y V = Velocidad [km/h]

Para este caso se obtiene que el valor P es cero (0.000) para todos los términos, validándose la significancia de ellos en el modelo.

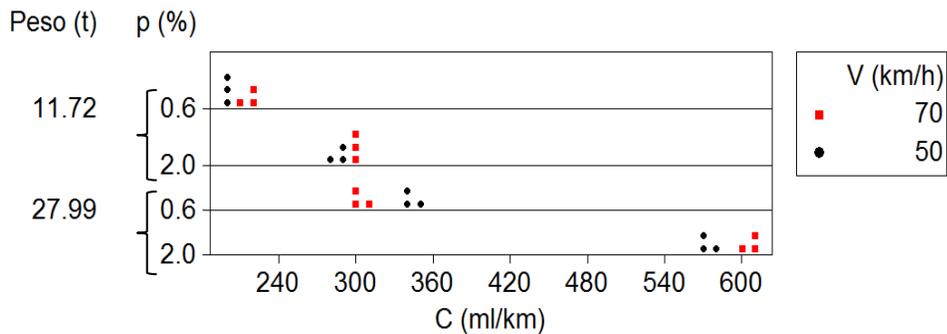
Los coeficientes de regresión obtenidos para este caso son:

$R^2 = 99.87\%$ $R^2_{ajustado} = 99.86\%$ y $R^2_{pronosticado} = 99.85\%$

El modelo es válido para representar los datos conocidos según los valores obtenidos de R^2 y $R^2_{ajustado}$. De igual manera pronostica de manera adecuada para valores, de los factores, no incluidos en el cálculo del modelo ya que el estadístico $R^2_{pronosticado}$ es alto; sin embargo esto es limitado a valores dentro de los rangos estudiados.

6.2.4 Camión C3 - Factorial 2^K . Para este caso, la gráfica de puntos que muestra el comportamiento de los datos se presenta en la Figura 43, y los resultados del análisis ANOVA en la Tabla 24.

Figura 43. Gráfica de puntos – Factorial 2^K – Camión C3



Fuente: Elaboración propia usando *Minitab*®

En la Figura 43 se ve en términos generales la forma como el consumo de combustible se incrementa con aumentos de la pendiente, y muy especialmente del peso del vehículo.

Se puede identificar, en la Tabla 24, por los resultados del análisis estadístico que los factores o efectos principales en forma individual y sus interacciones son significativos, y que ningún término es innecesario según los R^2 . Por esto para los análisis posteriores deben contemplarse todos los factores e interacciones de ellos.

En la Figura 44, la Figura 45 y la Figura 46 se muestran las gráficas de residuos, efectos principales y de interacción, respectivamente.

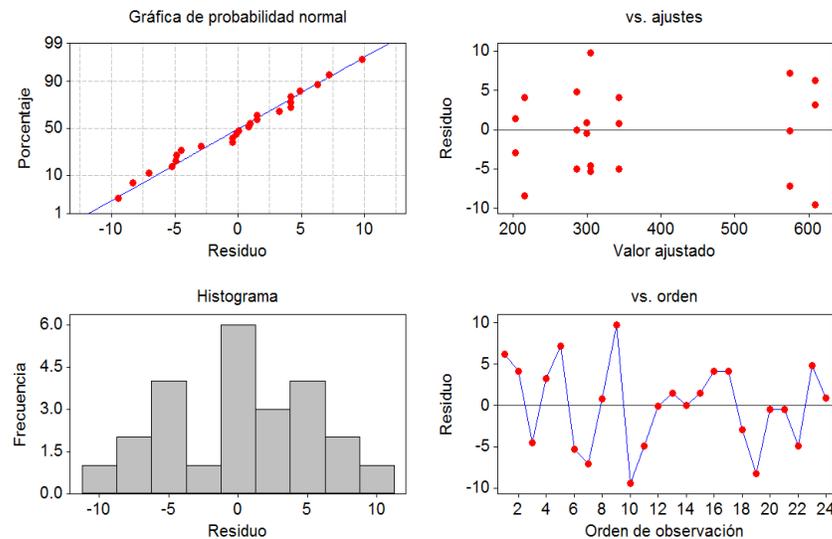
Tabla 24. Resultados ANOVA – Factorial 2^K – Camión C3

Fuente	GL	SC Sec.	SC Ajust.	MC Ajust.	F	P
Efectos principales	3	442063	442063	147354	3957.66	0.000
Peso (t)	1	256398	256398	256398	6886.37	0.000
p (%)	1	185490	185490	185490	4981.91	0.000
V (km/h)	1	175	175	175	4.70	0.045
Peso (t)*p (%)	1	50983	50983	50983	1369.32	0.000
Peso (t)*V (km/h)	1	325	325	325	8.72	0.009
p (%)*V (km/h)	1	2065	2065	2065	55.46	0.000
Peso (t)*p (%)*V (km/h)	1	1826	1826	1826	49.03	0.000
Error residual	16	596	596	37		
Error puro	16	596	596	37		
Total	23	497858				

GL=Grados de libertad; SC=Suma de cuadrados; MC=Media de cuadrados=SC/GL
 $R^2 = 99.88\%$ R^2 ajustado = 99.83%

Fuente: Elaboración propia

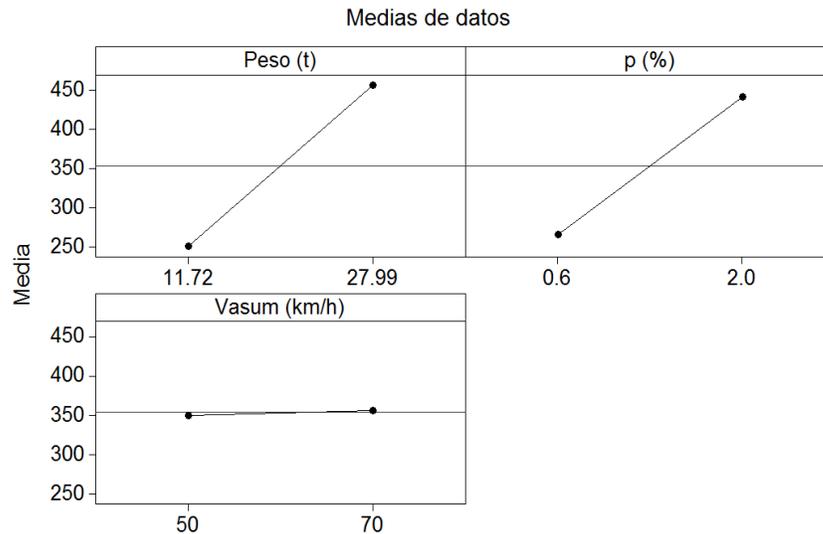
Figura 44. Residuos para consumo – Factorial 2^K – Camión C3



Fuente: Elaboración propia usando *Minitab*®

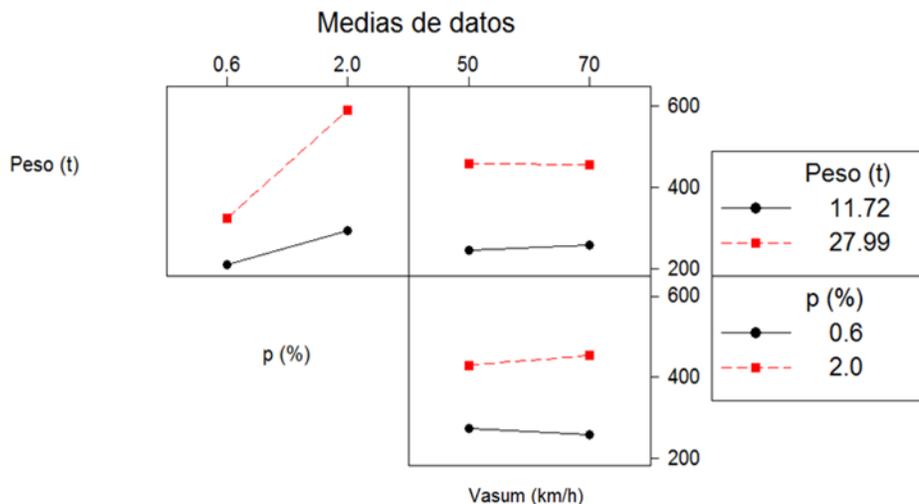
Según se observa en la Figura 44 hay adecuada distribución de los residuos ya que existe dispersión de los valores ajustados y no ajustados con respecto a cero (0) y la independencia temporal, que se evidencia por su comportamiento aleatorio según el orden de la observación; esto confirma que los datos considerados tienen validez estadística.

Figura 45. Efectos principales para consumo – Factorial 2^K – Camión C3



Fuente: Elaboración propia usando *Minitab*®

Figura 46. Interacción para consumo – Factorial 2^K – Camión C3

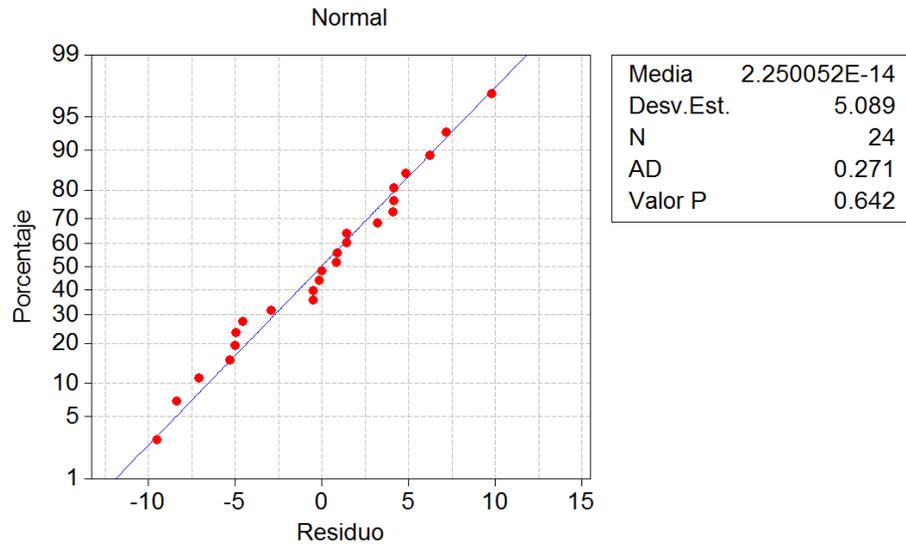


Fuente: Elaboración propia usando *Minitab*®

Por lo visto en la Figura 45 y la Figura 46, en general, el comportamiento del consumo de combustible es mayor al incrementar los valores de los parámetros estudiados, aunque para la velocidad se encuentra diferencia con respecto a lo encontrado para el factorial 3^K ya que en este caso se incrementa en términos generales aunque para baja pendiente el consumo disminuye si se incrementa la velocidad.

La distribución de residuos se muestra en la Figura 47, por su comportamiento gráfico puede verse que tienen distribución normal ya que los datos se ajustan a la línea recta, el valor P mayor a 0.05 lo confirma: por lo que los datos son normales.

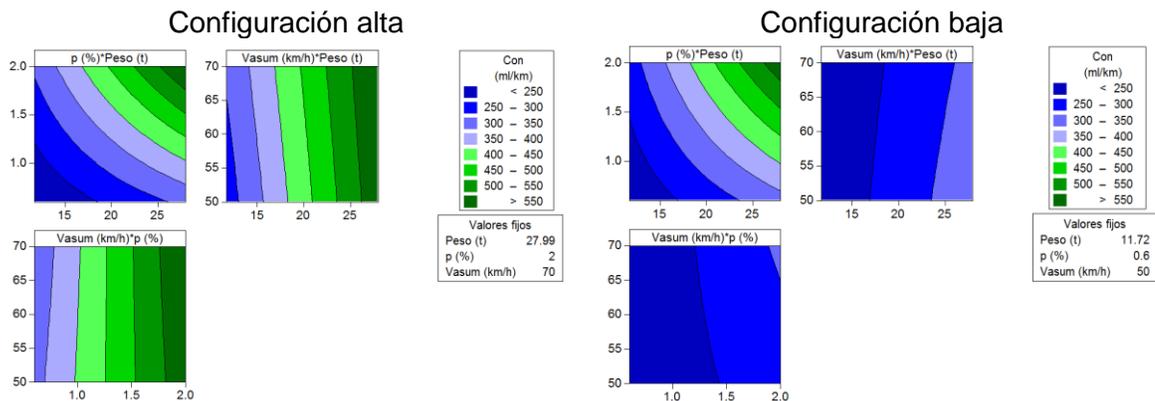
Figura 47. Probabilidad de residuos – Distribución normal - Factorial 2^K – Camión C3



Fuente: Elaboración propia usando *Minitab*®

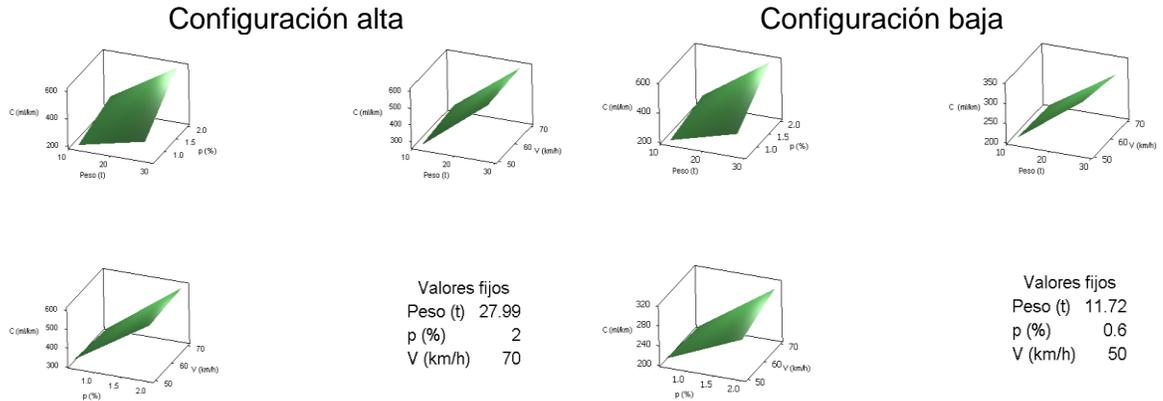
Las gráficas de contorno y superficie de respuesta para las configuraciones alta y baja de los factores se presentan en las Figura 48 y Figura 49 respectivamente, en las que se puede ver que el efecto de curvatura es menos evidente que en el caso anterior, lo cual es congruente con lo planteado de que a estos niveles de análisis el comportamiento del consumo de combustible es prácticamente lineal.

Figura 48. Gráfica de contorno – Factorial 2^K – Camión C3S3



Fuente: Elaboración propia usando *Minitab*®

Figura 49. Superficie de respuesta – Factorial 2^k – Camión C3S3



Fuente: Elaboración propia usando *Minitab*®

Por los análisis estadísticos se define que los datos utilizados tienen validez, por consiguiente se realiza con ellos análisis de regresión general utilizando todos los factores y sus interacciones incluyendo la posibilidad de efecto cuadrático. Este análisis de regresión permite obtener modelo matemático para la estimación del consumo de combustible, válido para los factores considerados y los rangos definidos por los niveles estudiados de tales factores; el modelo obtenido se presenta en la ecuación 35 y corresponde a aquel para el que el ajuste y significancia de los términos lo hacen estadísticamente válido

$$C = 14.595P + 38.8019p + 2.47673V - 0.207869P*V - 1.24498p*V + 0.135391P*p*V \quad (35)$$

Donde: C = Consumo [ml/km], P = Peso [t], p = Pendiente [%], y V = Velocidad [km/h]

El valor P obtenido para todos los términos es cero (0.000) por lo que es significativa su presencia en el modelo.

Los coeficientes de regresión obtenidos para esta regresión son:

$$R^2 = 99.98\% \quad R^2_{\text{ajustado}} = 99.97\% \quad \text{y} \quad R^2_{\text{pronosticado}} = 99.97\%$$

El modelo es aceptado dada la similitud de R^2 y R^2_{ajustado} ; el valor alto de $R^2_{\text{pronosticado}}$ valida que el modelo hace estimación adecuada con los factores incluidos en el cálculo del modelo. De esta manera puede hacerse predicción del consumo de combustible con los factores definidos y los rangos dados por los niveles de tales factores.

6.3 ANÁLISIS DE MODELOS DE CONSUMO DE COMBUSTIBLE ENCONTRADOS

6.3.1 Resumen de modelos encontrados. Se presentan en la Tabla 25 los modelos de consumo de combustible hallados, rangos para aplicación y estadísticos que los validan. Teniendo presente que se tiene nivel de confianza del 95% que los hace adecuados.

Tabla 25. Modelos de consumo de combustible encontrados

Vehículo	Modelo matemático	Rango de factores	Coefficientes de regresión	Valor P de términos
C3S3	$C = -49.3166P + 30.2423V + 20.6906P \cdot p + 0.355453P^2 - 24.9639p^2 - 0.514948V^2 - 0.021823P^2 \cdot p^2$	P: 19 - 52 p: 2 - 7 V: 25 - 35	$R^2 = 99.88\%$ $R^2_{aj} = 99.87\%$ $R^2_{pro} = 99.86\%$	0.000
C3S3	$C = 11.6719P - 1.79316V + 2.9518 P \cdot p + 0.0931592P \cdot V - 0.136448P^2$	P: 19 - 52 p: 0.6 - 2 V: 40 - 60	$R^2 = 99.94\%$ $R^2_{aj} = 99.93\%$ $R^2_{pro} = 99.91\%$	0.008 para V, y 0.000 para el resto
C3	$C = -8.00992P + 105.635p - 3.64516V + 15.2035P \cdot p - 20.5096p^2 - 0.0270028P^2 \cdot p^2$	P: 11.7-28 p: 2 - 7 V: 25 - 45	$R^2 = 99.87\%$ $R^2_{aj} = 99.86\%$ $R^2_{pro} = 99.85\%$	0.000
C3	$C = 14.595P + 8.8019p + 2.47673V - 0.207869P \cdot V - 1.24498p \cdot V + 0.135391P \cdot p \cdot V$	P: 11.7-28 p: 0.6 - 2 V: 50 - 70	$R^2 = 99.98\%$ $R^2_{aj} = 99.97\%$ $R^2_{pro} = 99.97\%$	0.000

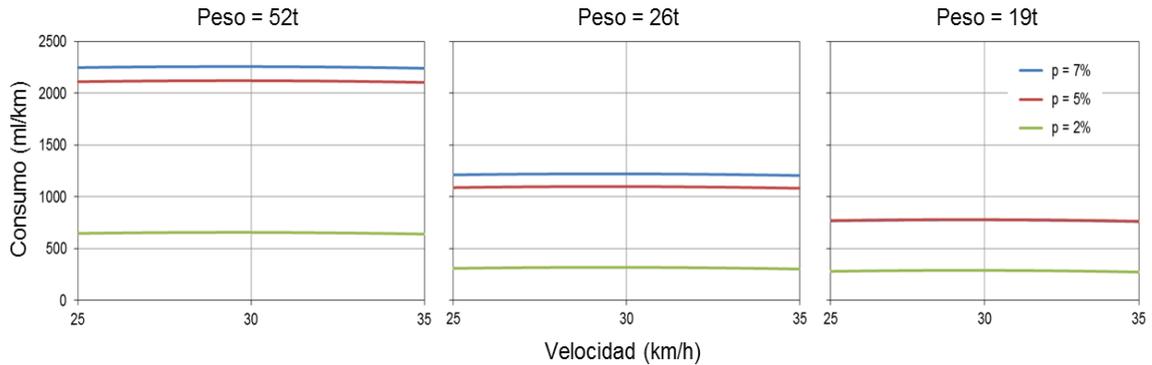
C = Consumo [ml/km], P = Peso [t], p = Pendiente [%], y V = Velocidad [km/h]
 $R^2_{aj} = R^2_{ajustado}$, $R^2_{pro} = R^2_{pronosticado}$

Fuente: Elaboración propia

6.3.2 Análisis para camión C3S3. A continuación se presentan gráficas y tablas que muestran el comportamiento previsto del consumo de combustible según algunas características de operación

En la Figura 50 se puede ver el efecto de la pendiente de la carretera según varias condiciones de peso y velocidad de operación considerando el factorial 3^K .

Figura 50. Efecto de la pendiente – Camión C3S3 – Factorial 3^K

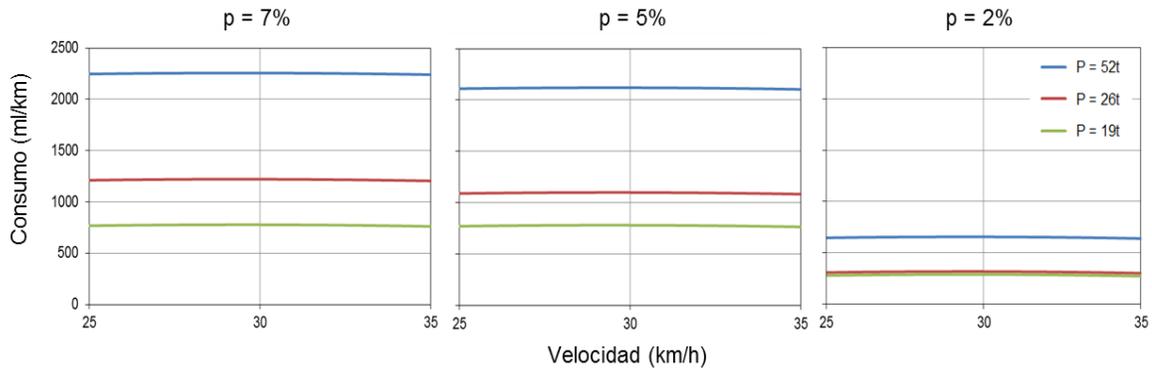


Fuente: Elaboración propia

Se puede observar el incremento que presenta el consumo de combustible cuando se eleva la pendiente de la carretera siendo dicho consumo creciente pero no proporcional con el aumento de la pendiente, es visible que dicho efecto es mayor para condiciones de alto peso del vehículo; de igual manera se identifica que para bajo peso del vehículo el consumo es similar para pendientes altas, a partir de 5.0% según cálculos realizados con el modelo.

La Figura 51 muestra el efecto del peso del vehículo según condiciones de pendiente de la carretera y la velocidad de operación según el factorial 3^K.

Figura 51. Efecto del peso del vehículo – Camión C3S3 – Factorial 3^K



Fuente: Elaboración propia

En este caso se evidencia el incremento del consumo de combustible por efecto del peso del vehículo, fenómeno que se acentúa de mayor manera para altas pendientes en donde por ejemplo para pendiente del 7% al comparar el consumo del vehículo vacío (19t) y cargado a capacidad permitida (52t), que significa una relación de 2.74, para el consumo esta relación es 2.92; mientras que para pendiente del 5% esta relación es 2.73, y 2.29 para pendiente del 2%. En la Tabla 26 se presentan resultados de esta comparación relativa entre peso y consumo para diferentes pendientes de la carretera de acuerdo con los resultados que se pueden obtener con los modelos identificados.

Tabla 26. Comparación relativa de consumo según peso – Camión C3S3 – Factorial 3^K

Peso (t)	Relación de Peso	Relación de consumo según pendiente (p)		
		p=7%	p=5%	p=2%
19 a 26	1.37	1.57	1.41	1.10
26 a 52	2.00	1.85	1.93	2.08
19 a 52	2.74	2.92	2.73	2.29

Fuente: Elaboración propia

Se puede concluir de los resultados presentados en la Tabla 26 que una pendiente cercana al 5% es la máxima adecuada para que el incremento en el consumo de combustible tenga un comportamiento similar al del incremento de peso del vehículo, pendientes mayores hacen que el consumo de combustible sea proporcionalmente mayor comparado con el del peso del vehículo generando ineficiencias en el transporte desde este punto de vista del consumo de combustible. Para pendientes entre 2% y 5% las relaciones de consumo son inferiores que las relaciones de peso del vehículo, desde luego los consumos son menores en valor absoluto para pendientes bajas.

En la Tabla 27 se muestra el estimativo de consumo de combustible relacionado con la cantidad de carga que transporte el camión en las situaciones de peso total 26t y 52t. Puede observarse como la mayor eficiencia es para la condición de baja pendiente y carga total.

Tabla 27. Consumo de combustible por cantidad de carga – Camión C3S3 – Factorial 3^K

Peso (t)		Consumo según pendiente y carga (ml/km-t)		
Total del Vehículo	Carga	p=7%	p=5%	p=2%
26	7	173.76	156.23	44.82
52	33	68.24	64.11	19.74

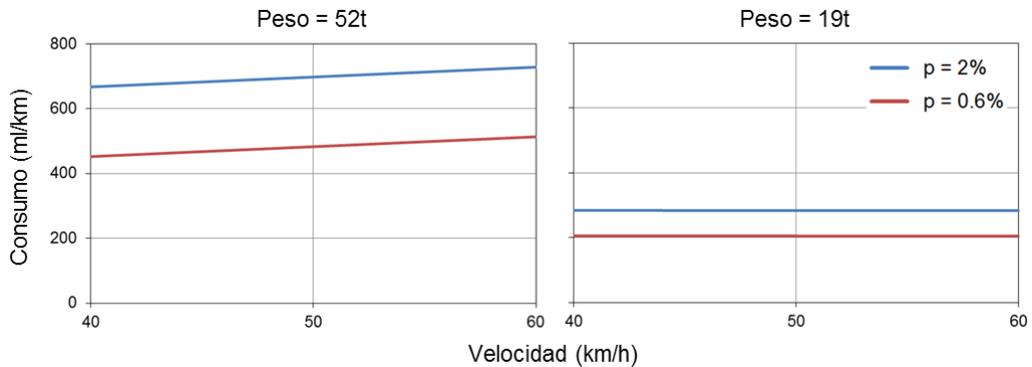
Tara del vehículo = 19t

Fuente: Elaboración propia

De lo observado en estos últimos análisis se puede concluir que es conveniente el uso de estos camiones (C3S3) a su mayor capacidad de carga inclusive para pendientes altas ya que el consumo por unidad de peso de la carga transportada es menor en comparación con otros niveles de carga; además pendientes superiores al 5% son inadecuadas para la eficiencia del transporte de carga en términos del consumo de combustible.

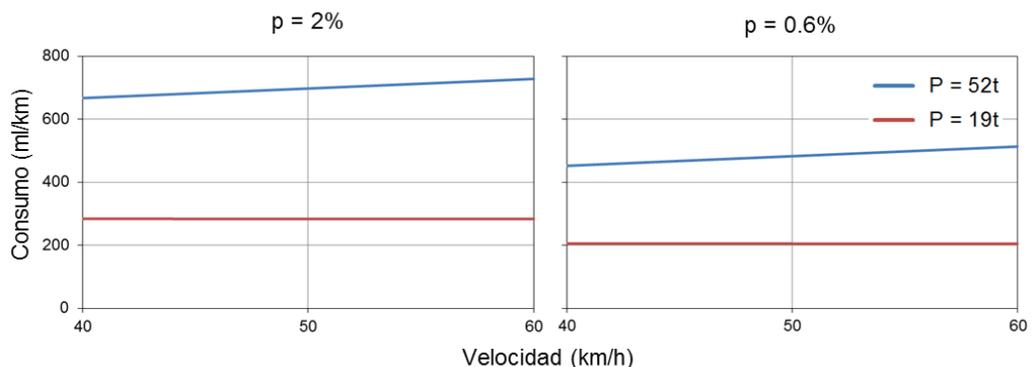
Para el caso de pendientes bajas, analizadas con el factorial 2^K se muestra en la Figura 52 el efecto de la pendiente de la carretera según varias condiciones de peso y velocidad de operación, y en la Figura 53 el efecto del peso del vehículo según condiciones de pendiente de la carretera y la velocidad de operación.

Figura 52. Efecto de la pendiente – Camión C3S3 – Factorial 2^K



Fuente: Elaboración propia

Figura 53. Efecto del peso del vehículo – Camión C3S3 – Factorial 2^K



Fuente: Elaboración propia

En forma similar al caso anterior se encuentra que para pendientes mayores el consumo se incrementa, aunque las diferencias no son importantes pues al pasar de pendiente 0.6% a 2% (relación 3.3) el consumo de combustible se incrementa en relación 1.44 para peso de 52t, y en 1.38 para 19t.

Para el cambio de peso desde 19t hasta 52t (relación 2.74), la relación de cambio en el consumo de combustible es 2.46 para pendiente del 2% y 2.35 para pendiente del 0.6%.

En la Tabla 28 se muestra el estimativo de consumo de combustible relacionado con la cantidad carga que transporte el camión en la situación de peso total 52t que para el caso de pendiente 2% muestra resultado similar al de la Tabla 27.

Aunque no son importantes algunas de las diferencias encontradas se concluye en general que el consumo de combustible se incrementa de manera importante con el

aumento del peso del vehículo (carga transportada) y que también influyen los aumentos de velocidad y pendiente; además que es conveniente utilizar los vehículos con la mayor cantidad de carga posible ya que se optimiza el consumo de combustible por unidad de distancia, tal como se puede ver en la Tabla 27.

Tabla 28. Consumo de combustible por cantidad de carga – Camión C3S3 – Factorial 2^K

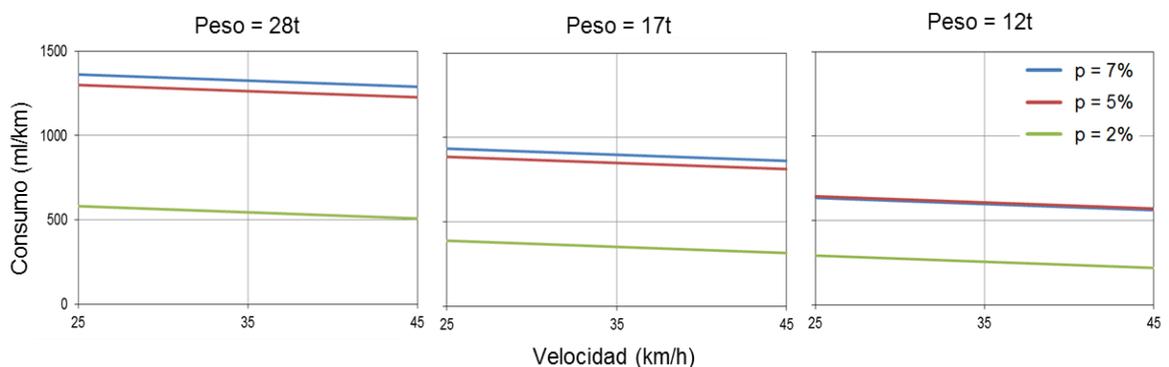
Peso (t)		Consumo según pendiente y carga (ml/km-t)	
Total del Vehículo	Carga	p=2%	p=0.6%
52	33	21.14	14.63

Fuente: Elaboración propia

6.3.3 Análisis para camión C3. A continuación se hace análisis similar al realizado para el camión C3S3 presentando gráficas y tablas que muestran el comportamiento previsto del consumo de combustible según algunas características de operación

En la Figura 54 se muestra, para el caso del factorial 3^K, el efecto de la pendiente de la carretera según varias condiciones de peso y velocidad de operación, en ella se puede observar que el incremento que presenta el consumo de combustible no es proporcional con el aumento de la pendiente. Para pesos bajos y a partir de pendiente del 5% el cambio de pendiente prácticamente no afecta el consumo, mientras que para pesos altos esta pendiente es del 5.5%, situación similar a la encontrada para el camión C3S3.

Figura 54. Efecto de la pendiente – Camión C3 – Factorial 3^K



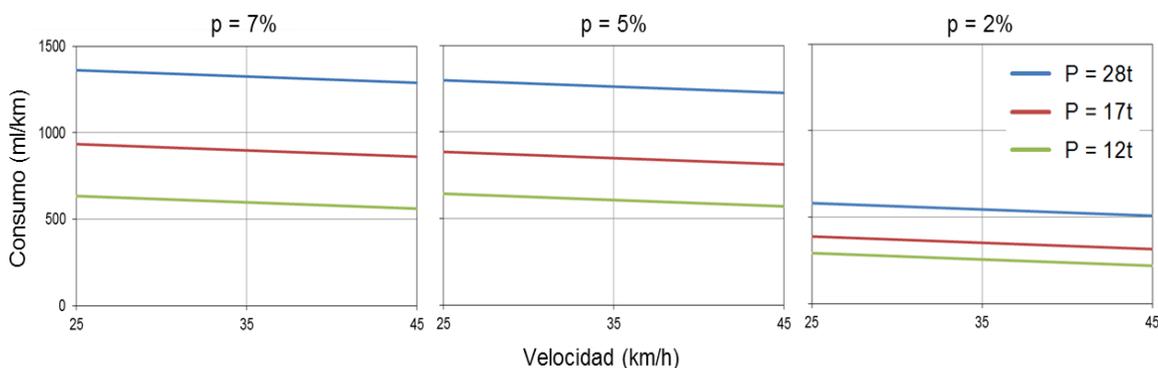
Fuente: Elaboración propia

La Figura 55 muestra el efecto del peso del vehículo según la pendiente de la carretera y la velocidad de operación para el factorial 3^K. En este caso se evidencia el incremento del consumo de combustible por efecto del peso del vehículo, fenómeno que se acentúa de mayor manera para altas pendientes. En la Tabla 29 se presentan resultados de esta

comparación relativa entre peso y consumo para diferentes pendientes de la carretera de acuerdo con los resultados que se pueden obtener con los modelos identificados.

Es común notar que según se incrementa la pendiente el consumo disminuye, cuando habría de esperarse lo contrario, esta situación ya ha sido abordada en el numeral 6.2.3 en el que se explica este fenómeno, para el caso de velocidades relativamente bajas.

Figura 55. Efecto del peso del vehículo – Camión C3 – Factorial 3^k



Fuente: Elaboración propia

Para pendiente del 7% al comparar el consumo del vehículo vacío (12t) y cargado a capacidad permitida (28t), que significa una relación de 2.33, para el consumo esta relación es 2.22; mientras que para pendiente del 5% esta relación es 2.08 y 2.13 para pendiente del 2%, es decir que el incremento de consumo es menor al del peso; comportamiento similar se tienen para otras relaciones de peso lo que muestra que este vehículo es más eficiente que el C3S3 ya que para este último la relación de incremento de consumo es mayor que la del peso. Esto lleva a recomendar, por consumo de combustible, el uso de camión C3 en lugar de C3S3 siempre que la carga a transportar sea posible para éste.

Tabla 29. Comparación relativa de consumo según peso – Camión C3 – Factorial 3^k

Peso (t)	Relación de Peso	Relación de consumo según pendiente (p)		
		p=7%	p=5%	p=2%
12 a 17	1.42	1.50	1.40	1.38
17 a 28	1.65	1.48	1.49	1.55
12 a 28	2.33	2.22	2.08	2.13

Fuente: Elaboración propia

Esto concuerda con modelos de tamaño de envío y selección del tipo de camión desarrollados por Holguín-Veras y luego aplicados por Mesa (2008) en los que el tamaño

del envío se relaciona con la distancia del viaje y la elección del camión con una función de utilidad que depende de los costos del vehículo y del excedente de capacidad sobre la carga a transportar.

Se puede concluir de los resultados presentados en la Tabla 29 que, para un camión C3, una pendiente un poco mayor al 5% es la máxima adecuada para que el consumo de combustible tenga un comportamiento similar al del incremento de peso del vehículo, valor superior al encontrado para el camión C3S3 y que es lógico de esperar por las características de los vehículos.

El estimativo de consumo de combustible relacionado con la cantidad de carga que transporte el camión en las situaciones de peso total 17t y 28t se muestra en la Tabla 30, en la que se ve que la mayor eficiencia es para condición de baja pendiente y carga total.

Por los últimos análisis y resultados se puede concluir el camión C3 conviene utilizarlo a su mayor capacidad de carga aun en pendientes altas, ya que el consumo por unidad de peso de la carga transportada es menor en comparación con otros niveles de carga.

Tabla 30. Consumo de combustible por cantidad de carga – Camión C3 – Factorial 3^K

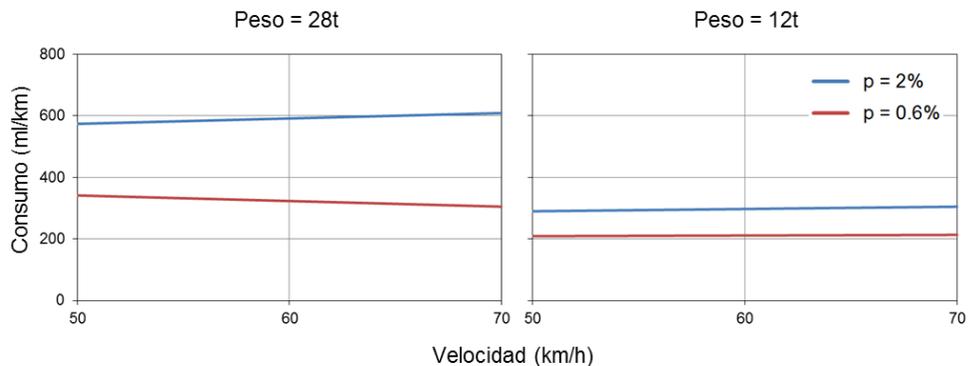
Peso (t)		Consumo según pendiente y carga (ml/km-t)		
Total del Vehículo	Carga	p=7%	p=5%	p=2%
17	5	179.51	169.78	70.24
28	16	82.82	78.93	34.01

Tara del vehículo = 12t

Fuente: Elaboración propia

Para pendientes bajas, analizadas con factorial 2^K, se muestra en la Figura 56 el efecto de la pendiente de la carretera según peso y velocidad de operación, y en la Figura 57 el efecto del peso según condiciones de pendiente de la carretera y velocidad de operación.

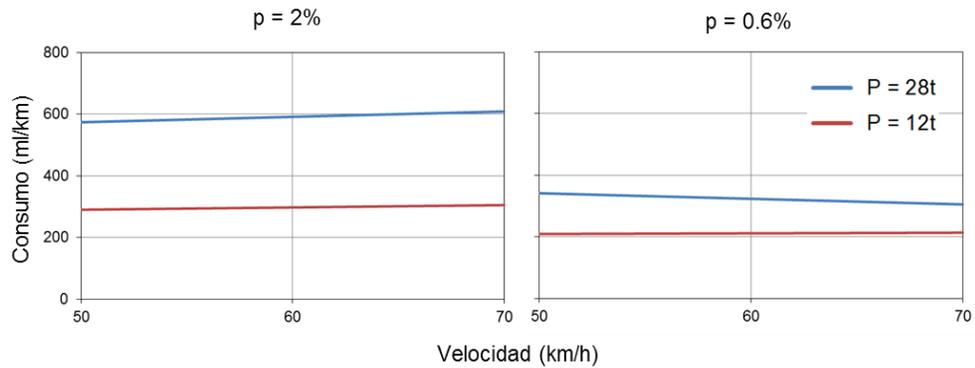
Figura 56. Efecto de la pendiente – Camión C3 – Factorial 2^K



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 56 llama la atención el comportamiento del consumo de combustible, para la condición del peso máximo (28t) y baja pendiente (0.6%), que es decreciente, ya que es diferente a otros resultados obtenidos incluso comparando con el camión C3S3, esta situación puede deberse al componente inercial que afecta la potencia requerida para el desplazamiento del vehículo, exigiéndole menos consumo; al revisar la información recopilada durante las pruebas en campo no se identifica otra posible explicación por algún evento que permita explicar esta situación.

Figura 57. Efecto del peso del vehículo – Camión C3 – Factorial 2^K



Fuente: Elaboración propia

En forma similar al caso anterior se encuentra que para pendientes mayores el consumo se incrementa, aunque las diferencias no son importantes pues al pasar de pendiente 0.6% a 2% (relación 3.3) el consumo de combustible se incrementa en relación 1.83 para peso de 28t, y en 1.40 para 12t.

Para el caso de cambio de peso desde 12t hasta 28t (relación 2.33), la relación de cambio en el consumo de combustible es 1.99 para pendiente del 2% y 1.53 para pendiente del 0.6%.

En la Tabla 31 se muestra el estimativo de consumo de combustible relacionado con la cantidad carga que transporte el camión en la situación de peso total 28t, en la que para el caso de pendiente 2% muestra resultado similar al de la Tabla 30.

Tabla 31. Consumo de combustible por cantidad de carga – Camión C3 – Factorial 2^K

Peso (t)		Consumo según pendiente y carga (ml/km-t)	
Total del Vehículo	Carga	p=2%	p=0.6%
28	16	36.95	20.19

Fuente: Elaboración propia

Se concluye en general que el consumo de combustible, para el camión C3, se incrementa con el aumento de la velocidad cuando esta está por encima de los 50km/h, pendiente y especialmente del peso, y que es conveniente utilizar los vehículos con la mayor cantidad de carga posible ya que se optimiza el consumo de combustible por unidad de distancia, tal como se puede ver en la Tabla 30.

Combinando los resultados obtenidos para ambos camiones y pesos similares, relacionados con el consumo según pendiente y carga, y con los ajustes necesarios para poder realizar comparaciones, se obtiene lo que se muestra en la Tabla 32.

Tabla 32. Comparación de consumo entre camiones C3S3 y C3

Tipo de vehículo	Peso (t)		Consumo según pendiente y carga (ml/km-t)		
	Vehículo	Carga			
			p=7%	p=5%	p=2%
C3S3	28	9	147.81	131.26	36.32
	35	16	105.25	92.28	24.35
C3	21	9	121.12	113.14	47.15
	28	16	82.82	78.93	34.01

Fuente: Elaboración propia

Al comparar resultados para peso total del vehículo de 28t para C3S3 y C3, con pendiente 7% y velocidad 25 km/h los consumos son 1326ml/km y 1362ml/km respectivamente, por lo que el C3S3 consume casi 3% menos combustible por unidad de distancia y al parecer es más económico; pero realmente es más económico utilizar el camión C3 debido a que puede llevar 7t mas de carga, es decir 78% mas de carga en comparación con las 9t que llevaría el C3S3 por solo un 3% menos de combustible, correspondientes a la diferencia en peso de los camiones vacíos; debe tenerse presente que generalmente se paga el servicio de transporte de carga por la cantidad movilizada.

Para el caso de 9t de carga efectiva igualmente sale favorecido el camión C3 como el de menor consumo por unidad de carga transportada excepto para condiciones de baja pendiente. Si se compara para 16t de carga transportada, que corresponde al máximo para el C3 de igual manera debe preferirse el C3 en general aunque para bajas pendientes resulta favorecido el C3S3.

Con los resultados y análisis, obtenidos y presentados, se logran cumplir varios objetivos de la investigación como son la identificación del efecto que sobre el consumo de combustible tiene la cantidad de carga transportada por un camión (o de otra manera el peso del vehículo) y la pendiente de la carretera; pero además se ha podido identificar el uso adecuado que se debe dar a un determinado vehículo según la cantidad de carga a transportar o bien seleccionar el vehículo adecuado según la cantidad de carga a transportar y la pendiente de la carretera por donde se circulará.

Se menciona que en varias ocasiones no es fácil seleccionar la velocidad del vehículo ya que está condicionada por características del vehículo y geométricas de la carretera entre otras, pero que la velocidad no es el factor más influyente en el consumo de combustible como se acaba de demostrar. No obstante el tener carreteras más planas, es decir con bajas pendientes, se podrá tener mejores velocidades que implican menor tiempo de viaje, aspecto importante en el servicio de transporte de carga y también en la evaluación económica de proyectos pero que no son objeto de esta investigación.

6.4 COMPARACIÓN CON RESULTADOS DEL MODELO HDM-4

Se presentan los resultados de consumo de combustible para los camiones C3S3 y C3 utilizando el modelo del HDM-4 y los encontrados en esta investigación, con el fin de compararlos e identificar de esta manera la posible relación que tienen y si existe algún valor que permita asociarlos para ajustar el modelo del HDM-4 a las condiciones consideradas en la investigación.

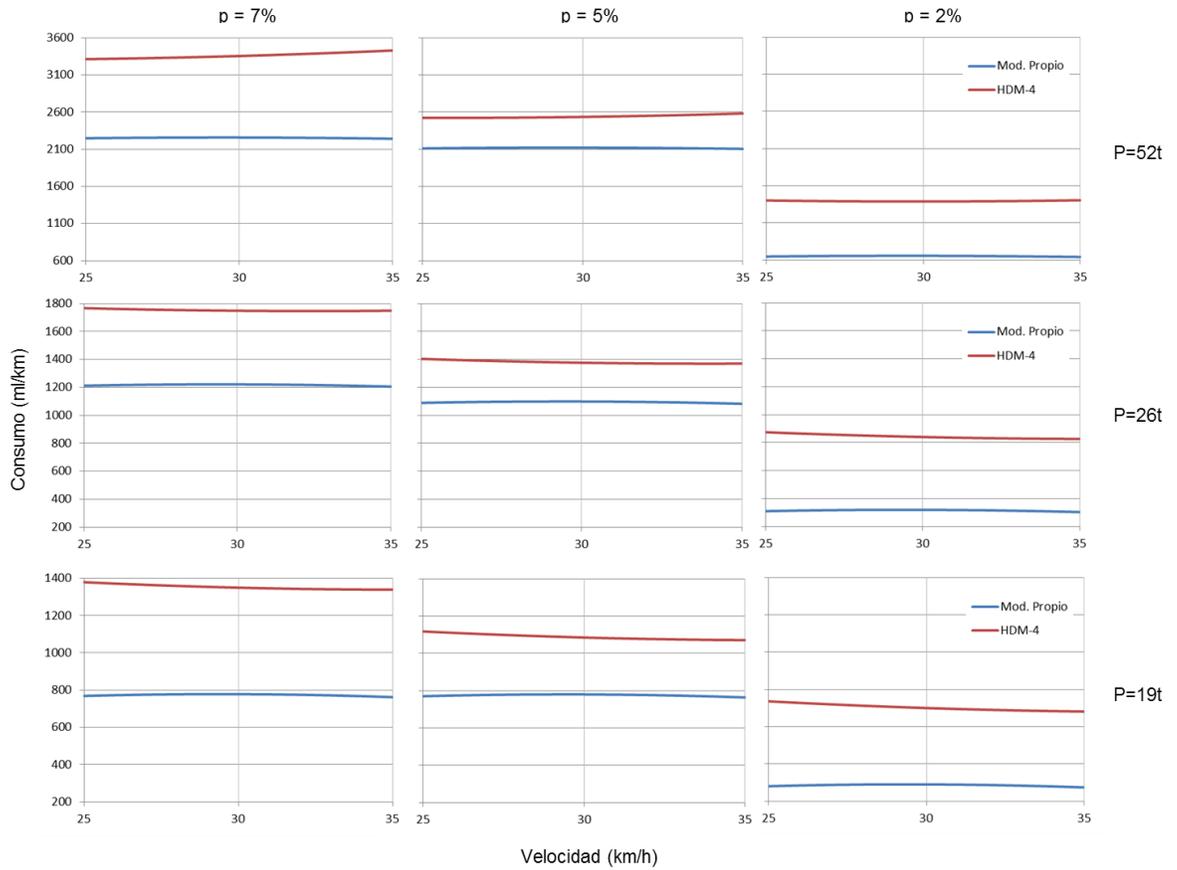
Para encontrar el consumo de combustible se desarrolla una aplicación en hoja de cálculo electrónica que permite encontrar los valores deseados de manera expedita, para el caso del HDM-4 se considera el modelo completo descrito en el capítulo 3, y en forma más detallada en el Anexo A, para el cual se recuerda se hace ajuste a una de sus fórmulas ya que en los manuales de usuario hay error en una de ellas (ver capítulo 3); los modelos encontrados en esta investigación son los presentados en la Tabla 25.

Para el caso del camión C3S3 se muestra en la Figura 58 el comportamiento del consumo de combustible, con el modelo propio desarrollado en esta investigación y con el modelo HDM-4, acorde con la velocidad de operación del camión, para condiciones de 52t, 26t y 19t de peso total del vehículo, y pendiente de la carretera del 7%, 5% y 2%,

Puede verse en la Figura 58 que, para todos los casos, el modelo HDM-4 sobre valora el consumo de combustible, y se puede identificar que dicha sobre valoración no es constante ni estable dependiendo tanto del peso como de la pendiente, pero con mayor variabilidad con la pendiente.

En la Tabla 33 pueden apreciarse numéricamente las relaciones del consumo de combustible para las mismas condiciones mostradas en la Figura 58, teniendo presente que dichas relaciones son obtenidas a partir del promedio de las relaciones individuales para cada condición de operación con intervalo de 1km/h en el rango establecido de velocidades; dichas relaciones oscilan entre 0.37 y 0.83 significando esto que los consumos reales están entre 37% y 83% de los estimados con el modelo HDM-4, o de otra manera que el modelo HDM-4 sobre estima el consumo en valores entre 1.2 y 2.7 veces.

Figura 58. Consumo de combustible – Camión C3S3 – Modelo propio vs. HDM-4



Fuente: Elaboración propia

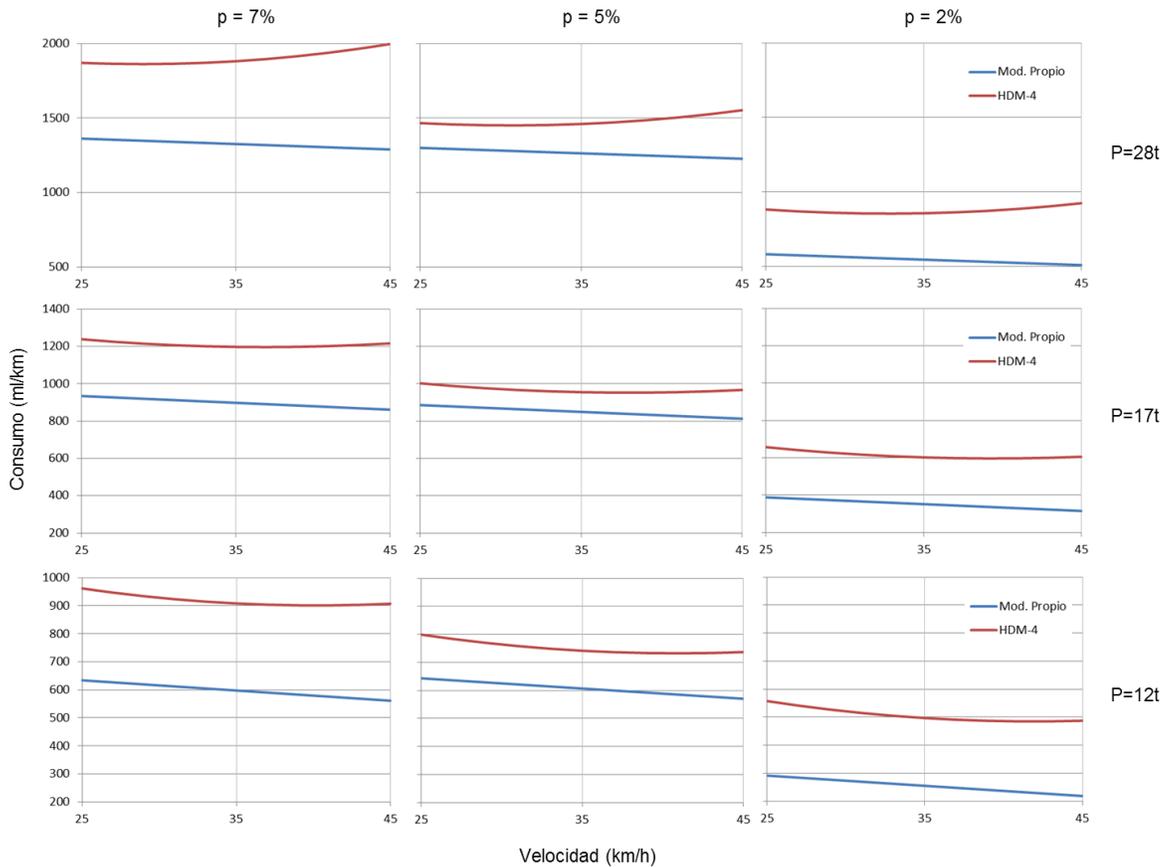
Tabla 33. Comparación consumo de combustible con HDM-4 – Camión C3S3

Peso (t)	Relación Modelo propio / HDM-4		
	Pendiente (%)		
	7	5	2
52	0.67	0.83	0.47
26	0.69	0.79	0.37
19	0.57	0.71	0.41

Fuente: Elaboración propia

Para el caso del camión C3 la información se presenta en las Figura 59 y Tabla 34.

Figura 59. Consumo de combustible – Camión C3 – Modelo propio vs. HDM-4



Fuente: Elaboración propia

De la misma manera como ocurre con el camión C3S3, se observa en la Figura 59 que el modelo HDM-4 sobre valora el consumo de combustible para todos los casos, y esta valoración no es constante ni estable dependiendo tanto del peso como de la pendiente.

Tabla 34. Comparación consumo de combustible con HDM-4 – Camión C3

Peso (t)	Relación Modelo propio / HDM-4		
	Pendiente (%)		
	7	5	2
28	0.70	0.85	0.62
17	0.74	0.88	0.57
12	0.65	0.81	0.50

Fuente: Elaboración propia

Pueden apreciarse, en la Tabla 34, las relaciones numéricas del consumo de combustible para las mismas condiciones mostradas en la Figura 59, siendo obtenidas con base en el

promedio de las relaciones individuales para cada condición de operación con intervalo de 2km/h en el rango establecido de velocidades; dichas relaciones oscilan entre 0.50 y 0.88 significando esto que los consumos reales están entre 50% y 88% de los estimados con el modelo HDM-4, o de otra manera que el modelo HDM-4 sobre estima el consumo en valores entre 1.1 y 2.0 veces. Se destaca en este caso que el rango de estas relaciones es menor al encontrado para el camión C3S3 y que sus valores están más próximos al consumo real, es decir que la predicción del consumo para el camión C3 con HDM-4 es más realista en comparación con el camión C3S3.

Con los resultados obtenidos de la comparación entre el consumo de combustible encontrado en esta investigación y los que se obtienen con el modelo del HDM-4, puede decirse que no hay única relación entre ellos y por consiguiente no es posible encontrar algún factor que los correlacione de forma única; lo posible por el alcance de esta investigación es definir varios factores de corrección a los valores encontrados con el HDM-4 según peso del vehículo y pendiente de la carretera, de tal manera que se pueda representar de mejor manera lo que se identifica en las condiciones reales estudiadas. Estos factores se presentan en la Tabla 35 para camión C3S3, y para el camión C3 en la Tabla 36.

Tabla 35. Corrección para consumo de combustible usando HDM-4 – Camión C3S3

Peso	Pendiente		
	Alta (≈7%)	Media (≈5%)	Baja (≈2%)
Alto (≈52t)	0.70	0.80	0.50
Medio (≈26t)	0.70	0.80	0.40
Bajo (≈19t)	0.60	0.70	0.40

Fuente: Elaboración propia

Tabla 36. Corrección para consumo de combustible usando HDM-4 Camión C3

Peso	Pendiente		
	Alta (≈7%)	Media (≈5%)	Baja (≈2%)
Alto (≈28t)	0.70	0.85	0.60
Medio (≈17t)	0.75	0.90	0.60
Bajo (≈12t)	0.65	0.80	0.50

Fuente: Elaboración propia

Con estos resultados se logra cumplir otro de los objetivos de la investigación al poder identificar la relación existente para el consumo de combustible entre el modelo HDM-4, de amplio uso internacional, y datos reales para ciertas condiciones de operación y uso de los camiones C3S3 y C3.

Estos resultados indican la necesidad de calibrar el modelo existente, si se desea utilizar, para que refleje la realidad del consumo de combustible y su comportamiento ante diversas alternativas de operación de los vehículos según las carreteras y la necesidad de uso de los mismos.

La calibración y adaptación de los modelos es un deber para poder que los resultados sean de real utilidad en los aplicaciones que se les de; el HDM-4 no escapa de esta situación máxime cuando sus relaciones básicas parten de pruebas hechas hace más de 20 años cuando los camiones eran diferentes a los de hoy en términos de las prestaciones, desempeño y consumo energético, entre otros, además las condiciones en particular para identificar el efecto de la cantidad de carga no fueron rigurosas; lo que se acaba de indicar aunado a los cambios tecnológicos de los vehículos y de la eficiencia del combustible hacen recomendar que cada cierto tiempo se actualicen los modelos de consumo de combustible.

7. CONCLUSIONES

El efecto de la cantidad de carga en el consumo de combustible en camiones es el tema abordado en esta investigación, que se considera tiene una alta participación en los costos de transporte, encontrándose un conjunto de modelos que permiten cuantificarlo adecuadamente para condiciones de operación definidas. Esto permite poder realizar evaluación de proyectos viales con mayor certidumbre en cuanto a los efectos por costos de operación vehicular según características de la infraestructura vial, parque automotor y carga prevista a ser movilizada; además permite poder realizar control a la operación de los camiones y programar de manera adecuada la flota de camiones disponible acorde con las necesidades. El peso del vehículo como variable dentro del conocimiento del consumo de combustible ha sido muy poco estudiada con rigor, en contraposición por ejemplo de la velocidad, por lo que se decide abordarlo además porque es común que los camiones realicen viajes no siempre con la misma cantidad de carga.

De manera más amplia puede y debe entenderse el factor Peso como el peso total del vehículo, pues hay un peso máximo permitido para cada vehículo definido por su diseño y más especialmente por las regulaciones estatales al pretender normalizar principalmente el efecto que se tiene sobre el pavimento, ya que dependiendo de la estructura adoptada en el camión para el transporte se define la cantidad de carga en peso que se podrá movilizar por dicho vehículo. Por ejemplo un camión C3S3 tiene autorización de transitar por las vías nacionales de Colombia con peso total máximo de 52t, por lo que dependiendo de su tara (peso vacío) puede transportar normalmente hasta 35t, pero este valor puede variar dependiendo del tipo de carrocería que utilice que puede ser estaca, volco, furgón, o simplemente planchón para el caso de contenedores por ejemplo, entre otros. Dado esto es que se prefiere, y se considera más adecuado considerar el peso total del vehículo conformado por la tara y la carga, en lugar de la cantidad de carga transportada, pues de esta manera los resultados de la investigación tienen mayor utilidad.

Otros factores considerados son la pendiente de la carretera, especialmente por el tipo de terreno y características de muchas carreteras que tienen valores altos de pendiente, aspecto que igualmente poco se ha estudiado según se puede establecer en la revisión bibliográfica (o estado del arte), aunada a la velocidad de operación sobre la cual si se han hecho diversos trabajos. De hecho, resultó ser más importante el efecto del peso y la pendiente en el consumo de combustible, que la misma velocidad.

Por la consideración de estos tres (3) factores en forma conjunta, en las que dos (2) de ellos han sido muy poco explorados, se estima que este trabajo es un aporte importante al conocimiento; los resultados obtenidos permiten ofrecer mejores condiciones para diferentes actividades dentro de los procesos de planeación del transporte como los que se mencionan al inicio de estas conclusiones.

El diseño de experimentos es una herramienta adecuada para la realización de pruebas experimentales dentro de una investigación dado que permite optimizar el uso de recursos humanos y económicos; es condición para el uso de esta metodología un buen conocimiento del fenómeno que se desea investigar así como las variables a considerar, propendiendo en todo momento tener control sobre dichas variables o factores y los

niveles que adoptan cada una de ellas durante las pruebas, pues de esta manera la posibilidad de obtener buenos resultados es alta.

Con los resultados y análisis, obtenidos y presentados, se logran cumplir varios objetivos de la investigación como son la identificación del efecto que sobre el consumo de combustible tiene la cantidad de carga transportada por un camión (equivalente al peso del vehículo) y la pendiente de la carretera; pero además se ha podido identificar el uso adecuado que se debe dar a un determinado vehículo según la cantidad de carga a transportar, o bien seleccionar el vehículo adecuado según la cantidad de carga a transportar y la pendiente de la carretera por donde se circulará.

El incremento del peso del vehículo (carga transportada) afecta de manera importante el consumo de combustible, especialmente para pendientes altas y muy particularmente por encima del 5%. De esto se concluye adicionalmente que no es adecuado, por lo menos para carreteras que sean corredores viales para movilización de carga, tener pendientes altas por que hacen que el transporte no sea eficiente debido a los altos consumos de combustible; puede ser preferible una carretera con pendiente baja en lugar de una con pendiente alta aunque su longitud sea mayor ya que seguramente los costos totales de transporte, compuestos básicamente por la inversión y los costos para los usuarios, serán menores, generando así bienestar social. El modelo de consumo de combustible aquí desarrollado permitirá evaluar mejor infraestructuras tales como túneles y viaductos en corredores de carga.

Es conveniente utilizar los camiones al máximo de su capacidad de carga (en peso) respetando en todo caso los límites establecidos por la legislación que regula los pesos máximos permitidos para cada tipo de vehículo. Para carga hasta de 16t, para lo cual pueden utilizarse indistintamente los camiones C3S3 y C3, se recomienda el uso de este último excepto para condiciones de carretera plana (pendientes menores al 3%), para la cual resulta el C3S3 con menor consumo por unidad de carga transportada (ml/km-t).

Se concluye en general que el consumo de combustible para el camión C3 se incrementa con el aumento de la velocidad, cuando esta está por encima de los 50km/h, pendiente y especialmente del peso, y que es conveniente utilizar los vehículos con la mayor cantidad de carga posible ya que se optimiza el consumo de combustible por unidad de distancia.

Esta investigación obtiene y presenta resultados que permiten predecir de muy buena manera el consumo de combustible para ciertas condiciones de operación de los camiones y de la carretera, dichos resultados se ven reflejados en varios modelos matemáticos en los que se consideran las variables definidas, y que tienen como característica importante ser de alta confiabilidad al emplearse un nivel de confianza del 95% y por el excelente ajuste con los datos que permiten obtenerlos, que son datos reales y validados estadísticamente.

Otro resultado que se obtiene, cumpliendo otros de los objetivos de la investigación, es la comparación entre el consumo de combustible encontrado en esta investigación y los que se obtienen con el modelo del HDM-4, con base en lo cual puede decirse que este modelo del HDM-4 no representa de manera adecuada el consumo de combustible en los camiones estudiados y para las condiciones analizadas, y que no hay una única relación entre ellos; por ejemplo se observan casos en los que el consumo es sobrevalorado hasta

en 2.7 veces con respecto al real para bajas pendientes, es decir que el consumo real es cercano al 40% del estimado con el HDM-4; y por consiguiente no es posible encontrar algún factor que los correlacione de forma única; esta investigación logra definir varios factores de corrección a los valores encontrados con el HDM-4 según peso del vehículo y pendiente de la carretera, de tal manera que se pueda representar de mejor manera lo que se identifica en condiciones reales. Esto es otro aporte importante de la investigación y que permite mejor fiabilidad en los procesos de evaluación de proyectos de carretera con HDM-4, y mejor planeación y operación de infraestructura vial y de flota de camiones.

Parte del éxito de esta investigación se basa en el adecuado planteamiento del diseño experimental y la definición de los factoriales respectivos, y muy especialmente al riguroso cuidado en la elaboración de las pruebas de campo cuidando detalles que permitieran tener control sobre las variables de estudio y otras externas que pudieran afectar los datos y resultados, como por ejemplo estilo de conducción, clima y flujo vehicular, entre otros.

Esta investigación se ha desarrollado contemplando dos tipos de camión, para uno de ellos no se han realizado investigaciones relacionadas con el consumo de combustible y seguramente por esta situación los modelos existentes no lo consideran. Se trata del tracto camión o camión articulado, que es camión con 6 (seis) líneas de rotación, o 6 (seis) ejes como comúnmente se cita, y que tiene las denominaciones genérica ">C5" y específica "C3S3" por parte del Ministerio de Transporte de la República de Colombia. Se destaca este hecho ya que es de gran importancia y se convierte en un aporte significativo al conocimiento por la masificación en el uso de este tipo de camiones a nivel internacional para el transporte de carga, que es indispensable para el desarrollo de las naciones.

Los modelos de consumo de combustible deben ser actualizados cada cierto tiempo, por ejemplo cada 10 años, para que en ellos se reflejen los cambios propios de los vehículos como fruto de los avances tecnológicos así como de la mejora en la eficiencia energética de los combustibles, en este último aspecto teniendo presente las modificaciones a los mismos como aquellos denominados biocombustibles y otros nuevos como el gas.

Los resultados obtenidos en este trabajo pueden ser aplicados dado que las experimentaciones se realizaron en condiciones reales de operación de los camiones, con estricto rigor en el control de las variables o bien la suspensión de las pruebas cuando no era posible controlar algunas situaciones; aunado a la validez estadística de la metodología utilizada, los datos recolectados y los modelos que se pudieron establecer.

Por último se manifiesta la conformidad con el hecho de que los resultados obtenidos por medio de modelación no pueden ser tomados como válidos hasta tanto no sean verificados con las condiciones reales; por lo que se indica la conveniencia de la adaptación, calibración y ajustes de los modelos a las condiciones de estudio prevalecientes en un determinado lugar o tiempo, y en general condiciones del sitio. Muestra de esto es lo encontrado con el HDM-4, en esta investigación, en la que los resultados reales llegan a ser hasta el 40% de lo estimado con dicho modelo sin calibrar, obteniendo entonces sobre valoraciones cercanas al 250%, que seguramente son inadecuadas para los fines propuestos de los estudios que se realicen por ejemplo con este programa computacional.

8. RECOMENDACIONES

Es conveniente ampliar el conocimiento en el tema abordado en esta investigación realizando otras en las que se consideren otros tipos de vehículo, incluso livianos, que permitan aumentar las razones por las cuales no es adecuado tener carreteras con altas pendientes, dado la ineficiencia que generan.

Otro aspecto de innegable interés y aplicación práctica es identificar el efecto que sobre el consumo de combustible se tiene cuando hay tramos viales con varias pendientes, es decir en forma conjunta la combinación de varias pendientes.

Deben realizarse otras investigaciones que permitan conocer el efecto de otras variables sobre el consumo de combustible, y que en esta investigación se han considerado constantes. Estas otras variables que no han sido estudiadas en esta investigación son, entre otros, la altitud del tramo vial, estado del pavimento, clima, cambios de velocidad o *noise acceleration*, longitud de tramos viales con determinada pendiente que es un concepto asociado al de longitud crítica de pendiente, curvatura de la carretera, estilo de conducción, y el tipo de combustible. Es posible que algunas de estas sean la causa para que los resultados obtenidos con el HDM-4 no reflejen la realidad conocida en esta investigación y por lo tanto requieren de ajuste en dicho modelo.

Se menciona y considera importante la variable del tipo de combustible dado que se ha estado generando a nivel mundial el uso de modificaciones al combustible fósil utilizado mayormente por los camiones que es el ACPM, dando lugar a los llamados biocombustibles que se obtienen con la mezcla o adición de productos de origen vegetal.

Otro elemento de análisis que se tiene, como consecuencia del consumo de combustible, es el impacto al ambiente por la contaminación debida al ruido y la emisión de contaminantes, aspecto que podría ser considerado para futuras investigaciones.

Los modelos que se utilicen para algún fin deben ser convenientemente validados para que los resultados que se obtengan sean ajustados a la realidad y así las decisiones que se desee tomar con dichos resultados se adecuen a lo requerido. Dicha validación debe hacerse mediante calibración del modelo o con el ajuste de los resultados utilizando factores de corrección.

Por último, según la evidencia encontrada, se recomienda por el tema de consumo de combustible no proyectar ni construir carreteras con pendientes mayores al 5% cuando dichas vías sean corredores importantes para movimiento de carga, como son las troncales y transversales que atraviesan grandes regiones, incluso países, y se dirigen por ejemplo a los puertos y que conectan importantes centros de producción y consumo.

Ampliar esta investigación, cuyo uno de sus aportes es la propuesta metodológica para realizar trabajos similares en otros escenarios geográficos, en los que se contemple diferente altitud por ejemplo, y otros vehículos de tal manera que se pueda tener con información que permita desarrollar un modelo más amplio y que se pueda complementar con la información obtenida de las encuestas de carga que realiza el Ministerio de Transporte y de esta manera poder planificar de mejor manera parte de la infraestructura

carretera del país pudiendo evaluar escenarios de desarrollo en esta área de inversión que es fundamental para el desarrollo económico.

Los resultados obtenidos con esta investigación pueden ser considerados para incluirse en el Sistema de Información de Costos Eficientes – SICE – que tiene el gobierno nacional de Colombia para hacer seguimiento entre otros a los costos operativos de los vehículos de carga y que a su vez sirven como guía para establecer las relaciones económicas entre los agentes que intervienen en el transporte de carga; y que puede ser replicado en otros países.

9. TRABAJOS FUTUROS

Existen otras variables en el consumo de combustible que no han sido estudiadas en esta investigación, siendo consideradas como valor fijo, como son la altitud del tramo vial, estado del pavimento, clima, cambios de velocidad o *noise acceleration*, longitud de tramos viales, curvatura de la carretera, estilo de conducción, tipo de combustible, entre otros, que son fuente propicia para el desarrollo de otras investigaciones similares, es posible que algunas de estas sean la causa para que los resultados obtenidos con el HDM-4 no reflejen la realidad conocida en esta investigación

Adicional a lo anterior está lo relacionado con los descensos, es decir considerar las pendientes negativas que existen en todas las carreteras, este aspecto no ha sido abordado según las consultas hechas y se convierte en otra fuente de investigación que presenta importancia especial en carreteras onduladas y montañosas.

Elemento importante a desarrollar es la consideración de otros vehículos con lo que al encontrar los modelos propios para ellos se puede tener toda una familia de modelos que permiten aplicaciones más amplias en las carreteras por donde circulan tipos diferentes de vehículos, sin dejar de reconocer que se trataría de vehículos representativos en cada una de las categorías.

El estudio del comportamiento del consumo de combustible para diferentes opciones hoy disponibles es necesario, es el caso de los biocombustibles y el gas que se están convirtiendo en opciones válidas de uso especialmente por aspectos ambientales; identificar el real impacto de su uso y comparar con el combustible tradicional es una necesidad.

BIBLIOGRAFÍA

ACADEMIA COLOMBIANA DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES - ACCEFYN -. Línea base para proyectos de transporte masivo. Bogotá D.C.: la Academia, 2003. 27 p.

ALTAMIRA, Aníbal. Determinación del consumo de combustible de vehículos pesados sobre distintos tipos de pavimento. Tesis de Doctorado en Ciencias de la Ingeniería. Santiago, Pontificia Universidad Católica de Chile. Escuela de Ingeniería, 2003. 216 p.

ALTAMIRA, Aníbal, *et al.* Calibration of fuel consumption model in HDM-4 model: An application to observed consumption in Canada and Chile. First Draft Version One. En: TRB 2004 Annual Meeting (2004: [s.l.]). Memorias. [s.l.]: Transportation Research Board, 2004. 26p.

BANDIVADEKAR, Anup. Evaluating the impact of advanced vehicle and fuel technologies in U.S. Light-Duty vehicle fleet. Thesis in Doctor of Philosophy in Technology, Management, and Policy. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2008. 182 p.

BELÁUSTEGUI, Victoria. Unidad de producción limpia y consumo sustentable. En: Congreso Internacional Transporte de Carga (2005?: [s.l.]). Memorias. Argentina 34 p.

BIGGS, D. y AKCELIK, R. Estimating effect of vehicle characteristics on fuel consumption. En: Journal of Transportation Engineering. Enero, 1987. vol. 113, no. 1, p. 101-106.

BOHMAN, Mats. On predicting fuel consumption and productivity of wheel loaders. Master's Thesis of Science Programme – Engineering Physics. Luleå: Luleå University of Technology, 2006. 39 p.

BOHÓRQUEZ AYA, Edwin. La venta de camiones creció 200%. En: El Espectador. Bogotá, D.C., 21, marzo, 2012. Sec. Negocios. p.11.

CAÑADAS, Javier. Costes de operación del tráfico en la carretera. Tesina. Barcelona, Universidad Politécnica de Cataluña, 2007. 158 p.

CASTAÑO TOSTADO, Eduardo y DOMÍNGUEZ DOMÍNGUEZ, Jorge. Diseño de experimentos: Estrategias y análisis en ciencia y tecnología. Querétaro: Universidad Autónoma de Querétaro, 2010. 428 p. ISBN 978-607-7740-56-8.

CHESHER, Andrew. y HARRISON, Robert. Vehicle operating cost: evidence from Developing Countries. Washington: Banco Mundial, 1987. 392 p. ISBN 0-8018-3588-7

COCA CASTAÑO, Pedro; COMPÉS LÓPEZ, Raúl y CAPÚZ RIZO, Salvador. Situación actual y perspectivas para el transporte internacional de cargas por carretera en la Comunidad Andina de Naciones. En: V Congreso de ingeniería de transporte – CIT 2002 (11-13, junio, 2002: Santander, Cantabria). Memorias. Santander: Universidad de Cantabria, 2002. p. 1769-1776.

COLIN, Sergio. El consumo y la gestión ambiental de combustibles y lubricantes en México. En: Comercio Exterior. Marzo, 2000, vol. 50, no. 3, p. 213-220.

COLOMBIA. CONSEJO NACIONAL DE POLÍTICA ECONÓMICA Y SOCIAL – CONPES -. Política Nacional de transporte público automotor de carga. Documento CONPES 3489. Bogotá D.C.: Departamento Nacional de Planeación, 2007. 26 p.

COLOMBIA. INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS - INVIAS. Volúmenes de tránsito 2006. Bogotá D.C.: el Instituto, 2006. 101 p.

COLOMBIA. INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS - INVIAS. Volúmenes de tránsito 2007. [Base de datos en archivo]. Bogotá D.C.: el Instituto, 2007.

COLOMBIA. INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS - INVIAS. Volúmenes de tránsito 2008. [Base de datos en archivo]. Bogotá D.C.: el Instituto, 2008.

COLOMBIA. MINISTERIO DE TRANSPORTE. Resolución 0000339 (26, febrero, 1999). Por la cual se derogan las Resoluciones 003700 del 8 de junio de 1995 y su modificatoria 007979 del 30 de diciembre de 1997, se establece la Nomenclatura de las carreteras a cargo de la nación y algunas a cargo de los Entes Territoriales y se dictan otras disposiciones. Bogotá D.C.: el Ministerio, 1999. 47 p.

COLOMBIA. MINISTERIO DE TRANSPORTE. Anuario Estadístico de Transporte – 2006. [Base de datos en archivo]. Bogotá D.C.: el Ministerio, 2006a.

COLOMBIA. MINISTERIO DE TRANSPORTE. Encuesta Origen – Destino a vehículos de carga de carga – Año 2004. [Base de datos en archivo]. Bogotá D.C.: el Ministerio, 2006b.

COLOMBIA. MINISTERIO DE TRANSPORTE. Diagnóstico del transporte 2010. [s.l.]: el Ministerio, 2010. 113 p.

CUMMINS. Cummins revela secretos para obtener más km/l. Conociendo la física para mejorar los km/l. [s.l.]: [s.n.], 2003?. 56 p.

DE SOLMINIHAC, Hernán. Gestión de Infraestructura Vial. 2 ed. Santiago: Pontificia Universidad Católica de Chile – Facultad de Ingeniería, 2001. 508 p.

EL ESPECTADOR. Colombia lidera venta de camiones. En: El Espectador. Bogotá D.C., 16, julio, 2011. Sec. Negocios. p.8.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - EPA. Fuel consumption modeling of conventional and advanced technology vehicles in the physical emission rate estimator (PERE) – Draft -. [s.l.]: la Agencia, 2005. 124 p.

FEDERACIÓN COLOMBIANA DE TRANSPORTADORES DE CARGA POR CARRETERA – COLFECAR. Estudios económicos [online]. 2012. Disponible en: www.colfecar.org.co/ESTUDIOS%20ECONOMICOS_archivos/estudios%20pdf/Estructura%20de%20Costos/2011/ESTRUCTURA%20DE%20COSTOS%20JUNIO%202011.pdf (visitada en mayo de 2012)

GIANNELLI, R. NAM, E. ARBOR, A. Medium and heavy duty diesel vehicle modeling using a fuel consumption methodology. [s.l.]: Environmental Protection Agency – EPA -, 2004. 27 p.

GRAHAM, Daniel. y GLAISTER, Stephen. Review of income and price elasticities of demand for road traffic. Londres: Centre for Transport Studies - Imperial College of Science, Technology and Medicine, 2002. 126 p.

GREENWOOD, Ian. A new approach to estimate congestion impacts for highway evaluation - Effects on fuel consumption and vehicle emissions. Thesis of Doctor of Philosophy in Engineering. Auckland: University of Auckland, 2003. 207 p.

GREENWOOD, Ian, BENNETT, Christopher. HDM-4 Fuel Consumption Modelling. [s.l.]: Universidad de Birmingham, 1995. 68 p.

GREENWOOD, Ian; DUNN, Roger y RAINE, Robert. Estimating the effects of traffic congestion on fuel consumption and vehicle emissions based on acceleration noise. En: Journal of Transportation Engineering. Febrero, 2007. vol. 133, no. 2, p. 96-104. ISSN 0733-947X/

GUTIÉRREZ PULIDO, Humberto y DE LA VARA SALAZAR, Román. Análisis y diseño de experimentos. 2 ed. México: McGraw-Hill/Interamericana Editores, 2008. 545 p. ISBN 978-970-10-6526-6.

HOLGUÍN-VERAS, José y THORSON, Ellen. Modeling commercial vehicle empty trips with a first order trip chain model. En: Transportation Research Part B. Febrero, 2003, no. 37, p. 129-148.

HOLGUÍN-VERAS, José, *et al.* Time-Dependent Effects on Parameters of Freight Demand Models. Empirical Investigation. En: Transportation Research Record. Octubre, 2011, vol.2224, p. 42-50.

HOLGUÍN-VERAS, José y PATIL, Gopal. Observed Trip Chain Behavior of Commercial Vehicles. En: Transportation Research Record. 2005, vol.1906, p. 74-80.

INGLATERRA. INTEGRATED TRANSPORT ECONOMIC APPRAISAL DIVISION – ITEA . Values of Time and Operating Costs. TAG Unit 3.5.6. Londres: Department for Transport, 2007. 21 p.

INTERNATIONAL STUDY OF HIGHWAY DEVELOPMENT AND MANAGEMENT TOOLS – ISOHDM. Highway Development and Management Series Collection – Volume 1: Overview of HDM-4. Birmingham: Universidad de Birmingham. 2000a. 53 p. ISBN 2-84060-060-9

INTERNATIONAL STUDY OF HIGHWAY DEVELOPMENT AND MANAGEMENT TOOLS – ISOHDM -. Highway Development and Management Series Collection – Volume 4: Analytical Framework and Model Descriptions. Birmingham: Universidad de Birmingham. 2000b. 562 p. ISBN 2-84060-062-5

INTERNATIONAL STUDY OF HIGHWAY DEVELOPMENT AND MANAGEMENT TOOLS – ISOHDM -. Highway Development and Management Series Collection – Volume 5: A Guide to Calibration and Adaptation. Birmingham: Universidad de Birmingham. 2000c. 229 p. ISBN 2-84060-063-3

MESA ARANGO, Rodrigo. Modelo estratégico de elección continua – discreta de tamaño de envío y tipo de vehículo en carreteras colombianas. Tesis de Maestría en Ingeniería Infraestructura y Sistemas de Transporte. Medellín: Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín -. Facultad de Minas, 2008. 80 p.

MÉXICO. INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE. Análisis de costos de operación vehicular del autotransporte de carga por la red carretera federal. Publicación Técnica No. 179. Sanfandila: el Instituto, 2001. 78 p. ISSN 0188-7297

MÉXICO. INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE. Estado superficial y costos de operación en carreteras. Publicación técnica No. 202. Sanfandila: El Instituto, 2002a. 91 p. ISSN 0188-7297.

MÉXICO. INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE. Desarrollo de un SIG para valorar los costos de operación vehicular del autotransporte de carga en carreteras federales. Publicación Técnica No. 205. Sanfandila: el Instituto, 2002b. 156 p. ISSN 0188-7297.

MONTGOMERY, Douglas. Design and analysis of experiments. 5 ed. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1997. 704 p. ISBN 9780471157465

MONTGOMERY, Douglas. Diseño y análisis de experimentos. México D.F.: Grupo Editorial Iberoamérica S.A. de C.V., 1991. 589 p. ISBN 968-7270-60-8.

MORENO T., Wilfrido. Aplicaciones al diseño y análisis de experimentos. Bucaramanga: Ediciones UIS, 1993. 330 p. ISBN 958-9318-03-7

SALAZAR, Juan Carlos y BAENA ZAPATA, Armando. Análisis y diseño de experimentos aplicados a estudios de simulación. En: Dyna. Septiembre, 2009, no. 159, p. 249-257.

SÁNCHEZ, Fernando. Sin título. Bogotá D.C.: [s.l.]: [s.n.], 2003, 17 p.

SARMIENTO ORDOSGOITIA, Iván y FRANCO QUINTERO, María Nelsy. El transporte de mercancías por carretera, un elemento esencial en la economía colombiana. En: V Congreso de ingeniería de transporte – CIT 2002 (11-13, junio, 2002: Santander, Cantabria). Memorias. Santander: Universidad de Cantabria, 2002. p. 1785-1792.

SOCIEDAD ALEMANA DE COOPERACIÓN TÉCNICA – GTZ -. América Latina y El Caribe frente a la coyuntura energética internacional: Oportunidades para una nueva

agenda de Políticas – Resumen Ejecutivo. En: Seminario Crisis alimentaria y energética: oportunidades y desafíos para América Latina y el Caribe. (4-5, septiembre: Santiago). Memorias. [s.n.], 2008: 7 p.

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD. Highway Capacity Manual 2000. Washington: National Academy of Sciences, 2000. ISBN 0-309-06681-6

UL-ISLAM, Riaz, *et al.* A preliminary calibration exercise of HDM-4's road user effect relationships for Japanese conditions. [s.l.]: Saitama University - Department of Civil & Environmental Engineering, 2003. 10 p.

UMAÑA GALLEGO, Juan David. En Colombia no sobran camiones. En: El Colombiano. Medellín, 18, febrero, 2012. Sec. Tendencias. p. 58-59

VERA, Julio. Política estatal sobre combustibles fósiles y biocombustibles. En: Exposición internacional de transporte de carga y afines – Expotranscarga (12-14, septiembre: Medellín, Antioquia). Memorias. Medellín: [s.n.], 2007. 65 p.

VOGETSEDER, Georg. Functional analysis of real world truck fuel consumption data. Master's Thesis in Computer Systems Engineering. Halmstad: Halmstad University, 2008. 65 p.

BIBLIOGRAFÍA COMPLEMENTARIA

CANAVOS, George C. Probabilidad y estadística. Aplicaciones y métodos. México D.F.: Mc Graw-Hill, 1993. 651 p. ISBN 968-451-856-0

COLOMBIA. MINISTERIO DE TRANSPORTE. Resolución 004100 (28, diciembre, 2004). Por la cual se adoptan los límites de pesos y dimensiones en los vehículos de transporte terrestre automotor de carga por carretera, para su operación normal en la red vial a nivel nacional. Bogotá D.C.: el Ministerio, 2004. 9 p.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN – ICONTEC. Documentación. Presentación de tesis, trabajos de grado y otros trabajos de investigación. NTC 1486 (Sexta actualización). Bogotá D.C.: el Instituto, 2012. 36 p.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN – ICONTEC. Referencias bibliográficas. Contenido, forma y estructura. NTC 5613. Bogotá D.C.: el Instituto, 2012. 33 p.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN – ICONTEC. Referencias documentales para fuentes de información electrónicas. NTC 4490. Bogotá D.C.: el Instituto, 2012. 23 p.

INTERNATIONAL STUDY OF HIGHWAY DEVELOPMENT AND MANAGEMENT TOOLS – ISOHDM -. Highway Development and Management Series Collection – Volume 2: Application guides. Birmingham: Universidad de Birmingham. 2000d. 369 p. ISBN 2-84060-060-9

INTERNATIONAL STUDY OF HIGHWAY DEVELOPMENT AND MANAGEMENT TOOLS – ISOHDM -. Highway Development and Management Series Collection – Volume 3: Software user guide. Birmingham: Universidad de Birmingham. 2000e. 151 p. ISBN 2-84060-061-7

INTERNATIONAL STUDY OF HIGHWAY DEVELOPMENT AND MANAGEMENT TOOLS – ISOHDM -. Highway Development and Management Series Collection – Volume 7: Modelling road user and environmental effects in HDM-4. Birmingham: Universidad de Birmingham. 2000f. 401 p. ISBN 2-84060-103-6

MINITAB INC. Meet Minitab® 16. [s.l.]: Minitab® Inc. 2010. 122 p.

www.cumandes.com

www.devimed.com.co/galeria.html

www.invias.gov.co

www.kenworthcolombia.com

www.mix-lap.com

ANEXO A. Descripción del modelo de consumo de combustible del HDM-4

Consumo de combustible instantáneo en el sentido de ida (subida)

$$IFC_{kpu} = \text{Máximo} \left[IDLE_FUEL_k, ZETA_{kpu} \cdot PTOT_{kpu} \cdot (1 + dFUEL_{kpu}) \right] \quad (1)$$

Donde:

IFC_{kpu} : Consumo instantáneo de combustible del vehículo k durante el período p de intensidad del tráfico (ml/s)

$IDLE_FUEL_k$: Tasa de consumo de combustible en la marcha en vacío, del tipo de vehículo k (ml/s).
Definido en la tabla E2.8 del Volumen 4, HDM-4, parte E

$ZETA_{kpu}$: Factor de eficiencia de la potencia del combustible, en el sentido de ida, del tipo de vehículo k (ml/kW/s)

$PTOT_{kpu}$: Requisito de la potencia total en el sentido de ida, del movimiento de viaje (kW)

$dFUEL_{kpu}$: Factor de consumo de combustible adicional debido a los ciclos de cambio de la velocidad del vehículo

Ahora,

$$ZETA_{kpu} = ZETAB \cdot \left\{ 1 + EHP \cdot \left(\frac{PTOT_{kpu} - PCTPENG \cdot \frac{PENGACCS_{kpu}}{100}}{PRAT_k} \right) \right\} \quad (2)$$

Donde:

- ZETAB* : Factor básico de la eficiencia del combustible (ml/kW/s).
Definido en la tabla E2.8 del Volumen 4, HDM-4, parte E
- EHP* : Descenso de la eficiencia del motor cuando desarrolla alta potencia.
Definido en la tabla E2.8 del Volumen 4, HDM-4, parte E
- PCTPENG* : Porcentaje de la potencia total del motor y los accesorios producidos por el motor.
Definido en la tabla E2.8 del Volumen 4, HDM-4, parte E
- PENGACCS_{kpu}* : Potencia de motor y accesorios del vehículo tipo *k* durante el período *p* de intensidad del tráfico.
En el sentido de ida (kW)

$$PENGACCS_{kpu} = K_{pea} \cdot PRAT_k \cdot \left[PACCS_{a1} + \frac{(PACCS_{a0} - PACCS_{a1}) \cdot (RPM_{kp} - RPM_{IDLE})}{(RPM_{100} - RPM_{IDLE})} \right] \quad (3)$$

K_{pea} : Factor de calibración de la potencia total del motor y los accesorios

PRAT_k : Tasa máxima de la potencia del motor del tipo de vehículo *k* (kW).
Definido en la tabla E2.8 del Volumen 4, HDM-4, parte E

PACCS_{a0} : Relación entre el arrastre del motor y los accesorios de un motor a 100 km/h (rev/min).
Definido en la tabla E2.8 del Volumen 4, HDM-4, parte E

RPM_{kp} : Velocidad del motor (rev/min). Se calcula de acuerdo a las siguientes ecuaciones:

Si $VU_{kp} \leq 5.6m/s$ entonces,

$$RPM_{kp} = RPM_{a0} + 5.6 \cdot RPM_{a1} + 31.36 \cdot RPM_{a2} \quad (4)$$

Si $VU_{kp} \leq RPM_{a3}$

$$RPM_{kp} = RPM_{a0} + RPM_{a1} \cdot VU_{kp} + RPM_{a2} \cdot VU_{kp}^2 \quad (5)$$

Si $VU_{kp} > RPM_{a3}$

$$RPM_{kp} = \frac{\left(RPM_{a0} + RPM_{a1} \cdot RPM_{a3} + RPM_{a2} \cdot RPM_{a3}^2 \right) \cdot VU_{kp}}{RPM_{a3}} \quad (6)$$

RPM_{a0} hasta RPM_{a3} : Parámetro del modelo de la velocidad del motor.

Definidos en la tabla E2.8 del Volumen 4, HDM-4, parte E.

RPM_{IDLE} : Velocidad del motor en marcha en vacío (rev/min)
Definido en la tabla E2.8 del Volumen 4, HDM-4, parte E.

RPM_{100} : Velocidad del motor calculada a 100 km/h (rev/min).
Se calcula de acuerdo a las siguientes ecuaciones:

Si $27.8m/s \leq RPM_{a3}$ entonces:

$$RPM_{100} = RPM_{a0} + 27.8 \cdot RPM_{a1} + 27.8^2 \cdot RPM_{a2} \quad (7)$$

De lo contrario:

$$RPM_{100} = \frac{\left(RPM_{a0} + RPM_{a1} \cdot RPM_{a3} + RPM_{a2} \cdot RPM_{a3}^2 \right) \cdot 27.8}{RPM_{a3}} \quad (8)$$

$PACCS_{a1}$: Parámetro del modelo.
Está relacionado con la tasa de consumo de combustible de la marcha en vacío.

$$PACCS_a1 = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (9)$$

$$b = ZETAB \cdot K_{pea} \cdot PRAT_k \quad (10)$$

$$a = ZETAB \cdot EHP \cdot K_{pea}^2 \cdot PRAT_k \cdot \frac{(100 - PCTPENG)}{100} \quad (11)$$

$$c = -IDLE_FUEL_k \quad (12)$$

Donde: $IDLE_FUEL_k$: Tasa de combustible en vacío (ml/s).
 Definido en la tabla E2.8 del Volumen 4, HDM-4, parte E

Reemplazando las ecuaciones (10), (11) y (12) en la ecuación (9), se obtiene:

$$PACCS_a1 = \frac{-\left(ZETAB \cdot K_{pea} \cdot PRAT_k\right) + \sqrt{\left(ZETAB \cdot K_{pea} \cdot PRAT_k\right)^2 - 4 \cdot \left(\frac{ZETAB \cdot EHP \cdot K_{pea}^2 \cdot PRAT_k \cdot (100 - PCTPENG)}{100}\right) \cdot \left(-IDLE_FUEL_k\right)}}{2 \cdot \left(\frac{ZETAB \cdot EHP \cdot K_{pea}^2 \cdot PRAT_k \cdot (100 - PCTPENG)}{100}\right)} \quad (13)$$

Reemplazando la ecuación (13) en (3):

$$\text{PENGACCS}_{kpu} = K_{pea} \cdot \text{PRAT}_k \cdot \left\{ \begin{array}{l} \left[\frac{-\left(\text{ZETAB} \cdot K_{pea} \cdot \text{PRAT}\right) + \sqrt{\left(\text{ZETAB} \cdot K_{pea} \cdot \text{PRAT}\right)^2 - 4 \cdot \left(\frac{\text{ZETAB} \cdot \text{EHP} \cdot K_{pea}^2 \cdot \text{PRAT}_k}{100}\right) \cdot \left(-\text{IDLE_FUEL}_k\right)}}{2 \cdot \left(\text{ZETAB} \cdot \text{EHP} \cdot K_{pea}^2 \cdot \text{PRAT}_k \cdot \frac{(100 - \text{PCTPENG})}{100}\right)} \right] + \\ \text{PACCS_a0} \cdot \left[\frac{-\left(\text{ZETAB} \cdot K_{pea} \cdot \text{PRAT}\right) + \sqrt{\left(\text{ZETAB} \cdot K_{pea} \cdot \text{PRAT}\right)^2 - 4 \cdot \left(\frac{\text{ZETAB} \cdot \text{EHP} \cdot K_{pea}^2 \cdot \text{PRAT}_k}{100}\right) \cdot \left(-\text{IDLE_FUEL}_k\right)}}{2 \cdot \left(\text{ZETAB} \cdot \text{EHP} \cdot K_{pea}^2 \cdot \text{PRAT}_k \cdot \frac{(100 - \text{PCTPENG})}{100}\right)} \right] \cdot x \\ \left[\frac{\left(\text{RPM}_{kp} - \text{RPM_IDLE}\right)}{\left(\text{RPM100} - \text{RPM_IDLE}\right)} \right] \end{array} \right\} \quad (14)$$

Luego, el requisito de potencia total del motor ($PTOT_{kpu}$) se calcula, según la potencia de tracción total sea cero ó negativa, de la siguiente forma:

$$\text{Si } PTR_{kp} \geq 0$$

$$PTOT_{kp} = \frac{PTR_{kp}}{EDT} + PENGACCS_{kp} \quad (15)$$

Si $PTR_{kp} < 0$

$$PTOT_{kp} = PTR_{kp} \cdot EDT + PENGACCS_{kp} \quad (16)$$

Donde:

PTR_{kp} : Potencia total de tracción del tipo de vehículo k durante el periodo p de la intensidad del tráfico (kW)

EDT : Eficiencia de la destreza del conductor. Definido en la tabla E2.8 del Volumen 4, HDM-4, parte E

Ahora,

$$PTR_{kp} = \frac{FTR_{kpu} \cdot VU_{kp}}{1000} \quad (17)$$

Donde:

FTR_{kpu} : Resistencia total al movimiento de viaje, experimentada por vehículo tipo k durante el periodo p de la intensidad del tráfico (N)

$$FTR_{kpu} = FA_u + FG_u + FR_u + FCV_u + FI_u \quad (18)$$

Siendo:

- FA_u : Resistencia aerodinámica al movimiento en sentido de ida (N)
- FG_u : Resistencia de la pendiente al movimiento en sentido de ida (N)
- FR_u : Resistencia de la rodada al movimiento en sentido de ida (N)

- FCV_u : Resistencia del arqueamiento al movimiento en sentido de ida (N)
- FI_u : Resistencia de la inercia en el sentido de ida (N)

VU_{kp} : Velocidad del tipo de vehículo k durante el periodo p de la intensidad del tráfico en el sentido de ida (m/s)

Remplazando la ecuación (18) en la (17):

$$PTR_{kp} = \frac{(FA_u + FG_u + FR_u + FCV_u + FI_u) \cdot VU_{kp}}{1000} \quad (19)$$

Donde:

$$FA_u = 0.5 \cdot RHO \cdot CD_{mult} \cdot CD \cdot AF \cdot VU_{kp}^2 \quad (20)$$

Siendo:

RHO : Densidad de la masa de aire (kg/m³)

$$RHO = 1.225 \cdot (1 - 2.26 \cdot ALT \cdot 10^{-5})^{4.255} \quad (21)$$

ALT : Altitud de la carretera, elevación del tramo de la carretera por encima del nivel del mar (m)

CD_{mult} : Multiplicador CD. Definido en la Tabla E2.4 del Volumen 4, HDM-4, parte E

CD : Coeficiente de arrastre aerodinámico. Definido en la Tabla E2.4 del Volumen 4, HDM-4, parte E

AF : Área frontal del vehículo, proyectada (m²). Definido en la Tabla E2.4 del Volumen 4, HDM-4, parte E

Remplazando (21) en (20):

$$FA_u = 0.5 \cdot \left(1.225 \cdot \left(1 - 2.26 \cdot ALT \cdot 10^{-5} \right)^{4.255} \right) \cdot CD_{mult} \cdot CD \cdot AF \cdot VU_{kp}^2 \quad (22)$$

$$FG_u = WGT_OPER \cdot g \cdot GR \quad (23)$$

Siendo:

WGT_OPER : Peso del vehículo en circulación (kg)

g : Aceleración debida a la gravedad. Tomada como 9.81 m/s^2

GR : Promedio de la pendiente del tramo de la carretera (como fracción)

Se estima a partir de la siguiente expresión tomada de *Watanatada et al. (1987a)*:

$$GR \pm \frac{RF}{1000} \quad (24)$$

RF : Promedio de rampa + Pendiente de la carretera (m/km)

De esta forma:

$$FG_u = WGT_OPER \cdot g \cdot GR \quad (25)$$

$$FR_u = FCLIM \cdot CR2 \cdot \left(b11 \cdot NUM_WHEELS + CR1 \cdot b12 \cdot WGT_OPER + CR1 \cdot b13 \cdot VU_{kp}^2 \right) \quad (26)$$

Siendo:

$FCLIM$: Factor de ajuste climático

$$FCLIM = 1 + 0.002 \cdot PCTDW + 0.003 \cdot PCTDS \quad (27)$$

PCTDW: Tiempo viajado en carreteras encharcadas

PCTDS: Tiempo viajado en carreteras cubiertas de nieve

CR2: Coeficiente dependiente del firme de la resistencia a la rodada

$$CR2 = K_{cr2} \cdot (CR_CR2_a0 + CR_CR2_a1 \cdot TD_{av} + CR_CR2_a2 \cdot RI_{av}) \quad (28)$$

K_{cr2}: Factor de resistencia a la rodada. Definido en la Tabla E2.3 del Volumen 4, HDM-4, parte E

CR_{CR2_a0} hasta *CR_{CR2_a2}*: Parámetro del modelo de resistencia. Definido en la Tabla E2.3 del Volumen 4, HDM-4, parte E

TD_{av}: Promedio de la profundidad de la textura de mancha de arena (mm) (*TD_{av}* se ajusta a cero en las carreteras sin sellar o de hormigón)

RI_{av}: Promedio de la regularidad de la carretera (IRI m/Km.).

b₁₁: Parámetro de la resistencia a la rodada

$$b_{11} = CR_B_a0 \cdot WHEEL_DIA \quad (29)$$

CR_{B_a0}: Parámetro de los neumáticos. Definido en la Tabla E2.4 del Volumen 4, HDM-4, parte E

WHEEL_DIA: Diámetro de la rueda (m). Definido en la Tabla E2.4 del Volumen 4, HDM-4, parte E

NUM_WHEELS: Número de ruedas por vehículo. Definido en Tabla E2.4 del Volumen 4, HDM-4, parte E

CR1: Factor dependiente de las ruedas y el neumático

Si la rueda es de acero ó madera : *CR1* = 0.9

Si el tipo de rueda es neumático : $CR1 = 1.0$
 Si el tipo de neumático es radial : $CR1 = 1.0$
 Si el tipo de neumático es de cámara : $CR1 = 1.3$

b_{12} : Parámetro de resistencia a la rodada

$$b_{12} = \frac{CR_B_a1}{WHEEL_DIA} \quad (30)$$

CR_B_a1 : Parámetro de los neumáticos. Definido en la Tabla E2.4 del Volumen 4, HDM-4, parte E

b_{13} : Parámetro de resistencia a la rodada

$$b_{13} = \frac{CR_B_a2 \cdot NUM_WHEELS}{WHEEL_DIA^2} \quad (31)$$

CR_B_a2 : Parámetro de los neumáticos. Definido en Tabla E2.4, Volumen 4, HDM-4, parte E

Ahora, reemplazando en la ecuación (26) las ecuaciones (27), (28), (29), (30) y (31) se obtiene:

$$FR_U = (1 + 0.002 \cdot PCTDW + 0.003 \cdot PCTDS) \cdot [Kcr2 \cdot (CR_CR2_a0 + CR_CR2_a1 \cdot TDav + CR_CR2_a2 \cdot RIav)]$$

$$\times \left\{ \begin{array}{l} (CR_B_a0 \cdot WHEEL_DIA) \cdot NUM_WHEELS + CR1 \cdot \left(\frac{CR_B_a1}{WHEEL_DIA} \right) \cdot WGT_OPER + \\ CR1 \cdot \left(\frac{CR_B_a2 \cdot NUM_WHEELS}{WHEEL_DIA^2} \right) \cdot VU_{kp}^2 \end{array} \right\} \quad (32)$$

$$FCV_u = \frac{\text{Max} \left[0, \left(\frac{WGT_OPER \cdot VU_{kp}^2}{R} - WGT_OPER \cdot g \cdot e \right) \right]^2}{\frac{NUM_WHEELS \cdot CS}{1000}} \quad (33)$$

Siendo:

R : Promedio del radio de arqueamiento de la carretera (m). Se estima con la siguiente expresión tomada de *Watanatada et al. (1987a)*:

$$R = \frac{180000}{\pi \cdot \text{Max} \left(\frac{18}{\pi}, c \right)} \quad (34)$$

c : Promedio horizontal del arqueamiento de la carretera (Grados/km)

e : Sobre-elevación de la carretera – Peralte - (como una fracción)

CS : Rigidez de los bordes de los neumáticos

$$CS = K_{cs} \cdot \left[CS_{-a0} + \frac{CS_{-a1} \cdot WGT_OPER}{NUM_WHEELS} + CS_{-a2} \cdot \left(\frac{WGT_OPER}{NUM_WHEELS} \right)^2 \right] \quad (35)$$

K_{cs} : Factor de rigidez del neumático. Definido en la Tabla E2.7 del Volumen 4, HDM 4, parte E

CS_{-a0} hasta CS_{-a2} : Parámetros del modelo. Definido en la Tabla E2.7 del Volumen 4, HDM 4, parte E

Remplazando en la ecuación (33) las ecuaciones (34) y (35), se obtiene:

$$FCV_u = \frac{\left[\text{Max} \left(0, \frac{WGT_OPER \cdot VU_{kp}^2}{\left(\frac{180000}{\pi \cdot \text{Max} \left(\frac{18}{\pi}, c \right)} \right)} - WGT_OPER \cdot g \cdot e \right) \right]^2}{1000 \cdot \left\{ \text{NUM_WHEELS} \cdot \left[Kcs \cdot \left[CS_a0 + \frac{CS_a1 \cdot WGT_OPER}{\text{NUM_WHEELS}} + CS_a2 \cdot \left(\frac{WGT_OPER}{\text{NUM_WHEELS}} \right)^2 \right] \right] \right\}} \quad (36)$$

$$FI_u = WGT_OPER \cdot EMRAT \cdot ACC \quad (37)$$

Siendo:

ACC : Aceleraciones del vehículo (m/s²)

EMRAT : Parámetro de resistencia de la inercia

$$EMRAT = EMRAT_a0 + EMRAT_a1 \cdot \text{Tan}^{-1} \left(\frac{EMRAT_a2}{VU_{kp}^3} \right) \quad (38)$$

EMRAT _a0 hasta *EMRAT* _a2: Parámetro de resistencia de la inercia. Tabla E2.4. Volumen 4, HDM 4, parte E

Ahora, reemplazando la ecuación (38) en la ecuación (37), se obtiene:

$$F_{I_u} = \text{WGT_OPER} \cdot \left(\text{EMRAT_a0} + \text{EMRAT_a1} \cdot \text{Tan}^{-1} \left(\frac{\text{EMRAT_a2}}{\text{VU}_{kp}^3} \right) \right) \cdot \text{ACC} \quad (39)$$

De esta forma, reemplazando en la ecuación (18) las ecuaciones (22), (25), (32), (36) y (39), se obtiene que la resistencia total al movimiento de viaje, experimentada por el tipo de vehículo k durante el periodo p de la intensidad del tráfico (FTR_{kpu}), es:

$$\begin{aligned}
FTR_{kp} = & 0.5 \cdot \left(1.225 \cdot \left(1 - 2.26 \cdot ALT \cdot 10^{-5} \right)^{4.255} \right) \cdot CD_{mult} \cdot CD \cdot AF \cdot VU_{kp}^2 + WGT_OPER \cdot g \cdot \frac{RF}{1000} + \\
& (1 + 0.002 \cdot PCTDW + 0.003 \cdot PCTDS) \cdot [Kcr2 \cdot (CR_CR2_a0 + CR_CR2_a1 \cdot TDav + CR_CR2_a2 \cdot Rlav)] \cdot \left\{ \begin{aligned} & (CR_B_a0 \cdot WHEEL_DIA) \cdot NUM_WHEELS + \\ & CR1 \cdot \left(\frac{CR_B_a1}{WHEEL_DIA} \right) \cdot WGT_OPER + \\ & CR1 \cdot \left(\frac{CR_B_a2 \cdot NUM_WHEELS}{WHEEL_DIA^2} \right) \cdot VU_{kp}^2 \end{aligned} \right\} + \\
& \left[\begin{aligned} & \text{Max} \left[0, \left(\frac{WGT_OPER \cdot VU_{kp}^2}{\left(\frac{180000}{\pi \cdot \text{Max} \left(\frac{18}{\pi}, c \right)} \right)} - WGT_OPER \cdot g \cdot e \right) \right]^2 \\ & \frac{NUM_WHEELS \cdot \left\{ Kcs \cdot \left[CS_a0 + \frac{CS_a1 \cdot WGT_OPER}{NUM_WHEELS} + CS_a2 \cdot \left(\frac{WGT_OPER}{NUM_WHEELS} \right)^2 \right] \right\}}{1000} + WGT_OPER \cdot \left(EMRAT_a0 + EMRAT_a1 \cdot \tan^{-1} \left(\frac{EMRAT_a2}{VU_{kp}^3} \right) \right) \cdot ACC \end{aligned} \right]
\end{aligned}
\tag{40}$$

Ahora, reemplazando la ecuación (40) en la (17), se obtiene que la Potencia total de tracción del tipo de vehículo k durante el periodo p de la intensidad del tráfico (PTR_{kp}), es:

TABLAS

Tabla E2.1 Clases y características básicas de los vehículos representativos predefinidos										
Vehículo número	Tipo	Descripción	Abreviatura	Tipo de combustible	Número de ejes	Número de ruedas	Coef. de resistencia aerodinámica	Area frontal definida (m ²)	Tara (T)	Carga (T)
1	Motocicleta	Motocicleta o scooter	MC	P	2	2	0,70	0,8	0,1	0,2
2	Coche pequeño	Coche pequeño de pasajeros	PC-S	P	2	4	0,40	1,8	0,8	1,0
3	Coche mediano	Coche mediano de pasajeros	PC-M	P	2	4	0,42	1,9	1,0	1,2
4	Coche grande	Coche grande de pasajeros	PC-L	P	2	4	0,45	2,0	1,2	1,4
5	Furgoneta de reparto ligera	Furgoneta o pick-up	LDV	P	2	4	0,50	2,0	1,3	1,5
6	Furgoneta de reparto mediana	Camión muy ligero para reparto de artículos (4 ruedas)	LGV	P	2	4	0,50	2,8	0,9	1,5
7	Tracción 4 ruedas	Tipo de vehículo Land Rover/Jeep	4WD	P	2	4	0,50	2,8	1,5	1,8
8	Camión ligero	Camión pequeño de dos ejes rígidos (aprox. < 3.5 T)	LT	D	2	4	0,55	4,0	1,8	2,0
9	Camión mediano	Camión mediano de dos ejes rígidos (> 3.5 T)	MT	D	2	6	0,60	5,0	4,5	7,5
10	Camión pesado	Camión de varios ejes rígidos	HT	D	3	10	0,70	8,5	9,0	13,0
11	Camión articulado	Camión articulado o con trailer	AT	D	5	18	0,80	9,0	11,0	28,0
12	Mini-bus	Autobús/furgoneta pequeño (usualmente 4 ruedas)	MNB	P	2	4	0,50	2,9	1,1	1,5
13	Autobús ligero	Autobús ligero (aprox. < 3.5 T)	LB	D	2	4	0,50	4,0	1,75	2,5
14	Autobús mediano	Autobús mediano (3.5 - 8.0 T)	MB	D	2	6	0,55	5,0	4,5	6,0
15	Autobús pesado	Varios ejes o dos ejes grandes	HB	D	3	10	0,65	6,5	8,0	10,0
16	Autocar	Autobús grande para trayectos de largas distancias	COACH	D	3	10	0,65	6,5	10,0	15,0

Tabla E2.3 Parámetros del modelo de resistencia a la rodada									
		WGT_OPER ≤ 2500 kg				WGT_OPER > 2500 kg			
Clases de capa	Tipos de capa	CR_ CR2_ a0	CR_ CR2_ a1	CR_ CR2_ a2	Kcr2	CR_ CR2_ a0	CR_ CR2_ a1	CR_ CR2_ a2	Kcr2
Bituminosa	AM o ST	0,90	0,022	0,022	1	0,84	0,03	0,03	1
Hormigón	JP, JR o CR	0,90	0,022	0,022	1	0,64	0,03	0,03	1
Sin sellar	GR	1,00	0,00	0,075	1	1,00	0,00	0,075	1
Sin sellar	EA	0,80	0,00	0,10	1	0,80	0,00	0,10	1
Sin sellar	SA	7,50	0,00	0,00	1	7,50	0,00	0,00	1
Bloques	CB, BR o SS	2,00	0,00	0,00	1	2,00	0,00	0,00	1

Nota: Se usan las siguientes abreviaturas:

AM : Mezcla bituminosa
 ST : Tratamiento superficial
 JP : Juntas planas
 JR : Juntas reforzadas
 CR : Continuamente reforzadas
 CB : Bloque de hormigón
 BR : Adoquinado
 SS : De piedra

Tabla E2.4 Parámetros del cálculo de la resistencia a la rodada, de la inercia y aerodinámica												
Número de vehículo	Parámetros de resistencia aerodinámica			Parámetros de resistencia a la rodada						Parámetros de resistencia a la inercia		
	Multiplificador CD	Aero. Drag Coef.	Area protección frontal (m ²)	Número de ruedas	Diámetro de las ruedas (m)	Tipo de neumático	Parámetros de los neumáticos					
	CDMULT	CD	AF	NUM_WHEELS	WHEEL_DIA	TYRE_TYPE	CR_B_a0	CR_B_a1	CR_B_a2	EMRAT_a0	EMRAT_a1	EMRAT_a2
1	1,10	0,70	0,8	2	0,55	Bias	37	0,064	0,012	1,10	0	0
2	1,10	0,40	1,8	4	0,60	Radial	37	0,064	0,012	1,14	1,010	309,0
3	1,10	0,42	1,9	4	0,60	Radial	37	0,064	0,012	1,05	0,213	1260,7
4	1,10	0,45	2,0	4	0,66	Radial	37	0,064	0,012	1,05	0,213	1260,7
5	1,11	0,50	2,8	4	0,70	Radial	37	0,064	0,012	1,10	0,891	244,2
6	1,11	0,50	2,8	4	0,70	Bias	37	0,064	0,012	1,10	0,891	244,2
7	1,11	0,50	2,8	4	0,70	Bias	37	0,064	0,012	1,10	0,891	244,2
8	1,13	0,55	4,0	4	0,80	Bias	37	0,064	0,012	1,04	0,830	124
9	1,13	0,60	5,0	6	1,05	Bias	37	0,064	0,012	1,04	0,830	124
10	1,14	0,70	8,5	10	1,05	Bias	37	0,064	0,012	1,07	1,910	10,1
11	1,22	0,80	9,0	18	1,05	Bias	37	0,064	0,012	1,07	1,910	10,1
12	1,11	0,50	2,9	4	0,70	Radial	37	0,064	0,012	1,10	0,891	244,2
13	1,13	0,50	4,0	4	0,80	Bias	37	0,064	0,012	1,10	0,891	244,2
14	1,14	0,55	5,0	6	1,05	Bias	37	0,064	0,012	1,04	0,830	124
15	1,14	0,65	6,5	10	1,05	Bias	37	0,064	0,012	1,04	0,830	124
16	1,14	0,65	6,5	10	1,05	Bias	37	0,064	0,012	1,04	0,830	124

Tabla E2.7 Parámetros del modelo de rigidez de los bordes				
Coeficiente	WGT_OPER < =2500 kg		WGT_OPER > 2500 kg	
	Con cámara	Radial	Con cámara	Radial
CS_a0	30	43	8,8	0
CS_a1	0	0	0,088	0,0913
CS_a2	0	0	-0,0000225	-0,0000114
Kcs	1	1	1	1

Tabla E2.8 Parámetros predefinidos del modelo del combustible

Número de vehículo	Parámetros del modelo de la velocidad del motor				Velocidad del motor en vacío	Tasa de combustible en vacío	Eficiencia básica del combustible	Descenso en la eficiencia	Potencia tasada del motor	Eficiencia de la destreza del conductor	Potencia del motor y los accesorios	
	RPM_a0	RPM_a1	RPM_a2	RPM_a3	RPM_IDLE	IDLE_FUEL	ZETAB	EHP	PRAT	EDT	PACCS_a0	PCTPENG
	RPM	RPM/(m/s)	RPM/(m/s) ²	m/s	RPM	ml/s	ml/kW/s		kW			
1	2790	94,0	2,83	31	800	0,12	0,067	0,25	15	0,95	0,20	80
2	2280	17	0,83	42	800	0,25	0,067	0,25	60	0,90	0,20	80
3	2280	17	0,83	42	800	0,36	0,067	0,25	70	0,90	0,20	80
4	1709	7,16	0,99	42	800	0,48	0,067	0,25	90	0,90	0,20	80
5	2490	-30,4	2,25	34	800	0,48	0,067	0,25	60	0,90	0,20	80
6	2574	-27,8	2,46	32	800	0,37	0,067	0,25	55	0,90	0,20	80
7	2490	-30,4	2,25	34	800	0,48	0,057	0,10	60	0,90	0,20	80
8	1214	17,6	2,32	22	500	0,37	0,057	0,10	75	0,86	0,20	80
9	1214	17,6	2,32	22	500	0,37	0,057	0,10	100	0,86	0,20	80
10	1167	-24,0	1,76	22	500	1,12	0,056	0,10	280	0,86	0,20	80
11	1167	-24,0	1,76	22	500	1,12	0,055	0,10	300	0,86	0,20	80
12	2490	-30,4	2,25	34	800	0,48	0,067	0,25	60	0,90	0,20	80
13	1214	17,6	2,32	22	500	0,37	0,057	0,10	75	0,86	0,20	80
14	1214	17,6	2,32	22	500	0,37	0,057	0,10	100	0,86	0,20	80
15	1167	-24,0	1,76	22	500	1,12	0,057	0,10	130	0,86	0,20	80
16	1167	-24,0	1,76	22	500	1,12	0,057	0,10	150	0,86	0,20	80

Anexo B. Especificaciones del equipo referencia FM3306, marca *Mix Telematics*



PRODUCT FACT SHEET

FM 3306 and FM 3316

Overview

The FM 3306 (without backup battery) and FM 3316 (with backup battery), collectively referred to herein as the FM 3316, is the ideal on-board computer for the management of vehicle and driver performance, driver safety and vehicle utilization. The on-board computer enables the fleet manager to remotely monitor the performance of a vehicle. Data is recorded on a second-by-second basis with driver violations and detailed trip information being made available to the fleet manager in real-time.



The FM 3316 on-board computer interfaces directly with the vehicle's data bus supporting the CAN - J1939 and J1708 - J1587 standards.

Features

Recording information from the vehicle's data bus has several benefits over the traditional way of recording vehicle data. Where data is available up to 20 parameters may be monitored in real-time, installation of the unit does not require the connection of expensive 3rd party sensors, installation is quicker, more robust and the recorded data is more accurate.

CAN SUPPORT	
CAN Interface Standard	The FM 3316 supports CAN – J1939 and J1708 – J1587 standards.
Vehicle Data Support	When available on the vehicle's CAN bus, the FM 3316 is capable of recording up to 20 CAN/J1708 signals in real-time: Speed, RPM, fuel consumption, fuel tank level, PTO, coolant level, coolant temperature high, Oil pressure high, Oil level low, clutch over-load, maximum axle weight, brakes applied, clutch engaged, total engine hours, vehicle odometer, distance to next service, TCO drive recognize, TCO over speed and TCO direction indicator.
VEHICLE AND DRIVER MANAGEMENT	
Vehicle Access Control	A driver tag (code-plug) is used to identify and verify a driver. An optional starter interrupt can be used to immobilize the vehicle until such time as the driver presents an authorised driver tag.
Trip Data Recording	Standard recorded data includes: Date and time, Distance or hours, Speed or hours, RPM, Power takeoff, Fuel* usage, Trip start/depart/arrive/end time, Driver name and ID, Vehicle ID
Second-to-Second (Tacho) Data	The status of speed and RPM is recorded every second. This provides valuable in-depth information for accident analysis.
Violation & Event Monitoring	Standard event violations include: Over speed, Over revving (RPM), Over green band driving (low and high), Harsh braking, Rapid acceleration, Excessive idling, Overtime driving, Power takeoff (true or false)
Customizable Events	Define additional custom events such as panic button pressed, door open, no-go zone entered, sudden impact, warning lights activated, refrigerator temperature exceeded, etc.
Active Events	Receive data messages when selected standard or user-defined events occur, e.g. a cargo door opening in a no-go zone, driver arrived at customer location.
Driver Warning	A buzzer can be set to sound when an event occurs.
Servicing & Licensing	Set reminders for your vehicle's next service or for your vehicle/driver license expiry.
Backup Battery	The FM 3316 is equipped with an internal Backup Battery offering an additional layer of security, making tracking possible even if the vehicle's main battery has been disconnected. The Backup Battery starts to operate as soon as the supply to the main vehicle battery is cut. The FM 3306 does not include a Backup Battery.

LOCATIONS	
Manage Locations	Add any desired location such as customer, supplier or no-go zones.
Route Planning	Plan routes by entering stops, start times and duration of each stop. This can serve as daily job activity sheets for your drivers.
Active/Passive Tracking or Active Trail	Request the vehicle position in real-time or view the route taken after the trip has been downloaded. Active Trail allows hourly updating of the Fleet Manager software with GPS vehicle positions.
GPS Data Recording	A variety of positional information is recorded with every GPS point, e.g. vehicle and driver ID, date and time, latitude and longitude, altitude, heading, speed, number of satellites etc.
COMMUNICATION	
Downloading from/uploading to Vehicle	The GSM modem is used to download data from and upload data to the FM 3316. This allows for real-time tracking and immediate active event notifications. It is possible to upgrade firmware or update the configuration remotely over-the-air using the GSM modem, thus reducing the need to remove the vehicle from duty when performing maintenance.
Satellite Communication	Satellite communication allows limited data download from and upload to the FM 3316 when using the optional FM Sat Comms transceiver. This provides real-time tracking and event monitoring when out of GSM coverage. FM Sat Comms provides global coverage except at the extreme poles of the earth.
Voice Calls	GSM voice communication is possible when using the optional FM Voice Kit, which allows for hands-free operation.
Wireless Communications	The FM Wireless Kit allows data to be downloaded from, or uploaded to the FM OBC. Clients now have the option to make use of cheaper communication alternatives such as short range RF technologies like Wireless LAN. The Wireless LAN functionality of the FM Communications Suite provides the equivalent functionality as that of communications over GPRS.

General information

The FM300 Communicator includes:

- GSM/GPRS Antenna.
- GPS Antenna.
- Main harness with integrated buzzer includes the CAN interface wires in addition to conventional I/O wires (2 x frequency inputs, 3x digital / analogue input).
- FM300 code-plug harness and socket.
- Blue driver's plug (driver log-on).
- FM on-board computer user manual.
- J1708 2-wire harness
- Optional harnesses: serial harness, voice harness, I/O harness (2x frequency input, 5x digital / analogue input, ground and positive drive)

Technical description

Voltage Range	9V DC – 33V DC.
Input Protection	Complies with ISO7637 Part 1 and 2
Clock	Real time with independent battery back-up.
Firmware	Re-programmable firmware and configuration over wired and wireless media.
Ignition Input	Used to monitor the ignition switch status.
I/O Capabilities	8* digital / analogue inputs, 1* auxiliary frequency input, 1 relay drive output, 1 positive drive output, 1 starter interrupt, 1 RS232 serial interface, 1 CAN interface, 1 J1708 interface. * The eighth input (I8) is shared with the auxiliary frequency input (F4)

CAN	Normal operating speed: ~250Kbits per sec. Maximum operating speed: ~1Mbits per sec.
J1708	Normal operating speed: ~9600bits per sec. Maximum operating speed: ~9600bits per sec.
Inputs, Outputs & Events	Highly configurable inputs and events capable of output control.
Speed and RPM input filters	Speed and RPM calibration sensitivity is configurable.
Audio Interface	This interface allows the user to make voice calls using the optional FM Voice Kit, FM Keypad and FM300 Voice Kit Harness.
Buzzer & LED	Buzzer and LED are available to warn the driver and to provide feedback of the vehicle's status.
I ² C Bus	Intended for use with code-plugs used to identify drivers, calibrate, diagnose faults, upload firmware and new configurations, and to download logged data and unit specific configuration information. This bus can also be used to drive the FM Keypad which can be used for selecting driving reasons and allows the driver to make voice calls when used with the FM Voice Kit.
TTL Level Serial Port	Intended to be used by devices designed to work on a bus. The bus was specified to be a Multi-Master type to enable other intelligent devices to optionally work as master, relieving the FM 3316 of processing.
Memory	2MB of flash 31kB of RAM 352kB is dedicated to storing firmware 312kB for event data 128kB for tach data 384kB for buffering data.

Technical specifications

ENVIRONMENT	
Temperature	FM 3316 Storage: 5 to 35°C Operating: -20 to 55°C Backup Battery Charge: 0-45 °C Backup Battery Discharging: -20 to 50 °C FM 3308 Storage: -20 to 85°C Operating: -20 to 70°C
Circuit Protection	Conformal coating over the PCB and components (excluding connectors).
SUPPLY	
Current	Operating: <72mA at 28V (typical)* Sleep: <50mA at 28V (typical)* Powered Down: <3mA at 28V (typical)* Operating: <100mA at 12V (typical)* Sleep: <50mA at 12V (typical)* Powered Down: <2mA at 12V (typical)* * Firmware, unit configuration, GSM signal strength affect the current consumption. Current consumption is higher during GPS lock acquisition.
RELAY CIRCUIT	
Current Specifications	200mA (typical).
Maximum Continuous Voltage on Pin	33V
Protection	Transients will be clamped

EMC Directives	
EMC Tests	<ul style="list-style-type: none"> ▪ CE DIN EN 55022 (09/2003) ▪ DIN EN 61000-6-2 (03/2006) ▪ E1 ECE-Regulation No. 10, as last amended by Amendment 02 Supplement 2 (12/08/2004)
RS232 PORTS	
Maximum Speed	57600 Baud (higher rates possible with hardware flow control)
Protection (Transient)	15kV as per human body model
Protection (DC)	-12V , +12V
I ² C BUS	
Normal Operating Speed	~38Kbits per second
Maximum Supply Current (CLK)	<20mA
Protection (Transient)	15kV as per human body model
Protection (DC)	0V to +12V
REAL TIME CLOCK	
Time Loss	<10 Minutes per year (typical)/ <5 seconds when a GPS is used (auto synchronization)* *temperature change affects the accuracy of the RTC crystal, it's most accurate at +25°C.
Battery Backup Life	>5 Years (typical at -30° to +70°C)
GPS	
Channels	50
Update Rate	4Hz
Horizontal Position Accuracy	<2.5m
Accuracy DGPS/SBAS	<2.0m
Start-up Time	<2 Minutes
GSM	
GPRS	Multi-slot class 10
Quad Band	850/900/1800/1900 MHz
Transmit Power	Output power: - Class 4 (2 W) for EGSM850 - Class 4 (2 W) for EGSM900 - Class 1 (1 W) for GSM1800 - Class 1 (1 W) for GSM1900
SIM Card	3V

Auxiliary inputs/outputs

8 Configurable Analogue or Digital Inputs	8* analogue or digital inputs can be configured to monitor any device that generates a change in voltage. E.g. seat belts, headlights, refrigeration units, temperature sensors, emergency lights, doors, PTO, UDS, trailer coupling etc. Voltages are measured in the range of 0 – 38 volts in steps of approximately 0.15 volts. Inputs may be programmed to measure voltages between 0 and 5 volts in increments of approximately 0.02 volts. * The eighth input (I8) is shared with the auxiliary frequency input (F4)
1 Frequency Input	An auxiliary frequency input can be configured to monitor any device that generates a change in frequency e.g. liquid flow measurement or as a pulse counter e.g. electronic fuel consumption measurement (EDM). Frequencies of up to 150Hz can be measured or low board rate encoded RS232 inputs of up to 75 baud. * The auxiliary frequency input (F4) is shared with the eighth input (I8)
1 Relay Drive Output	The relay drive output can be used to drive a relay (with a current consumption of up to 150 mA) that can power a peripheral device on or off.
1 Positive Drive Output	Positive Drive output is used to power external devices at 2V below battery voltage and can supply current up to 1A.
1 Starter Interrupt	The FM 3316 has a dedicated starter interrupt. A relay socket comes fitted to the main power harness for this purpose.
1 RS232 Serial Interface	This can be connected to any RS232 serial device using the FM300 Serial Harness.
1 TTL Serial Interface	The FM Terminal can be connected using the FM300 Serial Harness. The FM Twin Serial Harness can be used to convert this to a standard RS232 port to connect a second serial device.
CAN Interface	This can be connected to a J1939 CAN bus using the yellow / green twisted wires on the main connector.
J1708 Interface	This can be connected to a J1708 bus using the separately supplied yellow / blue twisted wire.

Anexo C. Información técnica de los camiones utilizados

Camión C3S3



► CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

MOTOR:
Cummins:
-ISX 400 / 400HP/1800 RPM / 1450 Lbs.
-ISX 400ST2 / 400HP / 1800 RPM / 1550 ó 1650 Lbs.
-ISX 450 / 450HP / 1800 RPM /1650 Lbs.
-ISX 500 / 500HP / 2000 RPM / 1650 Lbs.
CAT:
-C12 380HP / 2100 RPM / 1450 Lbs.
-C12 410HP / 2100 RPM / 1550 Lbs.
-C12 430HP / 2100 RPM / 1650 Lbs.
-C15 435HP / 2100 RPM / 1650 Lbs.
-C15 500HP / 2100 RPM / 1650 Lbs.

CAJA DE VELOCIDADES:
Fuller:
RTO 16915 15 Velocidades
RTLO 16918 18 Velocidades
Embrague: Fuller 15 1/2" 7 Resortes
Enfriador Aceite: Caja de velocidades
Cardan: Tipo pesado SPL 250 XL

EJE DELANTERO:
Meritor: FG941 14.600 Lbs./FI941 20.000 Lbs.
Frenos: Dana Spicer 16.5" x 5" Para 14.600 Lbs. ó 22.000 Lbs.
Campanas: Hierro
Cubos: Rodamiento grande
Rachas: Haldex Autoajustables ó Mecánicas
Suspensión: Taperleaf con amortiguadores de 3 hojas de resortes.

EJE TRASERO:
Meritor: RT46-160P Simple reducción 46.000Lbs. RT50-190P Simple reducción 50.000Lbs.

CHASIS:
Medidas: 10 5/8" x 5/16"
Refuerzo Total: 10 5/8" o 10 3/4"
Puentes de Chasis: (7) de alta resistencia
Bomper: De 1 pieza cromado ó de 3 piezas en fibra de vidrio y aluminio.
Guardapolvos: Delanteros / Traseros Escualizables cromados tipo Bulldog.
Parrilla: Sobre el chasis en aluminio cromado
Quinta Rueda:
FW35-7801 XL para 55.000 Lbs.
FW0070-7603 XL para 70.000 Lbs.

LLANTAS Y RINES:
Llantas Delanteras: Bridgestone R250 EN 12R 22.5
Llantas Traseras: Bridgestone M729 295/80R 22.5
Rines: -Acero Accuride 22.5 x 8.25 -Aluminio KW Style 22.5 x 8.25

Fuente: www.kenworthcolombia.com.co

* Especificaciones y colores sujetos a cambio sin previo aviso

T800



CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	
MOTORES	
• Cummins	ISX 400 / 400HP/1800 RPM / 1450 Lbs. ISX 400ST2 / 400HP / 1800 RPM / 1550 ó 1650 Lbs. ISX 450 / 450HP / 1800 RPM / 1650 Lbs. ISX 500 / 500HP / 2000 RPM / 1650 Lbs.
• CAT	C12 380HP / 2100 RPM / 1450 Lbs. C12 410HP / 2100 RPM / 1550 Lbs. C12 430HP / 2100 RPM / 1650 Lbs. C15 435HP / 2100 RPM / 1650 Lbs. C15 500HP / 2100 RPM / 1650 Lbs.
CAJA DE VELOCIDADES	
• Fuller	RTO 16915 15 Velocidades RTLO 16918 18 Velocidades
• Embrague	Fuller 15 1/2" 7 Resortes
• Enfriador Aceite	Caja de velocidades
• Cardan	Tipo pesado SPL 250 XL
EJE DELANTERO	
• Meritor	FG941 14.600 Lbs./FI941 20.000 Lbs.
• Frenos	Meritor 16,5" x 5" Para 14.600 Lbs. ó 22.000 Lbs.
• Campanas	Hierro
• Cubos	Rodamiento grande
• Raches	Haldex Autoajustables ó Mecánicos
• Suspensión	Taperleaf con amortiguadores de 3 hojas de resortes.

T800	
EJE TRASERO	
• Meritor	RT 46-164PEH para 46.000 Lbs.
CHASIS	
• Medidas	10 5/8" x 5/16"
• Refuerzo Total	10 5/8" o 10 3/4"
• Puentes de Chasis	(7) de alta resistencia
• Bomper	De 1 pieza cromado ó de 3 piezas en fibra de vidrio y aluminio
• Guardapolvos	Delanteros / Traseros Escualizables cromados tipo Bulldog
• Parrilla	Sobre el chasis en aluminio cromado
• Quinta Rueda	FW35-7801 XL para 55.000 Lbs. FW0070-7603 XL para 70.000 Lbs.
LLANTAS Y RINES	
• Llantas Delanteras	Bridgestone R250 EN 12R 22.5
• Llantas Traseras	Bridgestone M729 295/80R 22.5
• Rines	Acero Accuride 22.5 x 8.25 Aluminio KW Style 22.5 x 8.25

Fuente: Kenworth de la Montaña, Medellín

El Vehículo utilizado tiene motor ISX400

Camión C3



▶ CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

MOTORES:
Cummins: ISX 400/1800RPM/1450 lbs, ISX 400ST2/400HP/1800 RPM/1550 O 1650 lbs, ISX 450/450HP/1800RPM/1650 lbs, ISX 500/500HP/2000RPM/1650 lbs

CAJA DE VELOCIDADES:
Fuller: RTO 16915 15 velocidades, RTO 16918 18 velocidades
Embrague: fuller 15 1/2" 7 resortes
Enfriador aceite: caja de velocidades
Cardan: tipo pesado SPL 250 XL

EJE DELANTERO:
Meritor: FG941 14600 Lbs/ F1941 20000 lbs
Frenos: meritor 16,5" x 5 para 14600 lbs o 22000 lbs
Campanas: hierro
Cubos: rodamiento grande
Rachas: haldex autoajustables o mecanicos
Suspensión: tarpeleaf con amortiguadores de 3 resortes

EJE TRASERO:
Meritor: RT 46-164peh para 46000 lbs

CHASIS:
Medidas: 10 5/8 x 5/16
Refuerzo total: 10 5/8 x 10 3/4
Puentes de chasis: 7 alta resistencia
Bomper: de 1 pieza cromado o de 3 piezas en fibra de vidrio y aluminio
Guardapolvos: delanteros/traseros escualizables cromados tipo bulldog
Parrilla: sobre el chasis en aluminio cromado
Quinta rueda: FW35-7801 XL para 55.000 lbs FW0070-7603XL PARA 70000Lbs

LLATAS Y RINES:
Llantas delanteras: bridgestone R250 en 12R 22.5
Llantas traseras: bridgestone M729 En 295/80R 22.5
Rines: acero acurridos 22.5 x 8.25
aluminio KW style 22.5 x 8.25

VOLCO:
Dana Spicer: EFA - 20 F4 para 20.000 lbs / Doble con enfriador

Fuente: www.kenworthcolombia.com.co

El vehículo utilizado tiene motor ISM350

Anexo D. Soporte de revisión técnica a los camiones

Camión C3S3

HOJA DE VIDA VEHICULO		PAGINA:	2
Cod. Vehículo: SNN-159	Placa	:	SNN-159
		FECHA :	2011/08/24
50-0109	MANGUERA DE DESFOGUE	C	1 62,258.00
Total Cliente:		4,077,943.00	Garan.: 0.00 Int.: 0.00
Observaciones : SNN159 KMS393993.COMEXION INSITE- LAVADO DE MOTOR-D/M TAPA D			
O.T. 001-046217	Fecha:2011/02/23 Kms.: 393,993	Recibido: PAG GONZALEZ SANDOVAL PAOLA	Est: CER
50-1130	REPARACION DE RADIADOR		92,800.00
Total Cliente:		0.00	Garan.: 0.00 Int.: 92,800.00
Observaciones : SNN159 KMS393993.GT x PROCED.INADECUADO-REPARACION RADIADOR			
O.T. 001-048080	Fecha:2011/08/01 Kms.: 84,387	Recibido: PAG GONZALEZ SANDOVAL PAOLA	Est: CER
30-001	-015 ATENCION COMERCIAL (PRUEBA DE BLOW B 30	I	2.600 165,880.00
Total Cliente:		0.00	Garan.: 0.00 Int.: 165,880.00
Observaciones : SNN159 KMS84387. ATENCION COMERCIAL...PRUEBA DE BLOW BY-FRUE			
Total Cliente:		5,635,424.00	Garan.: 0.00 Int.: 258,680.00

O.T. No. 48080 Pico: SUM 189 VOLUMEN: 15X Serie: 79190735

Sintoma reportado por el cliente: PRUEBAS UNIVERSIDAD NACIONAL

PASO	DESCRIPCION	RESULTADO	OK
1	PRUEBA BLOW BY	2 in Hg	
2	PRUEBA DESMONTAJE TODOS LOS CILINDROS RESULTO ESPECIFICACION		
3	PRUEBA DE CORTA; FUNCIONAMIENTO NORMAL		
4	REVISION PARAMETROS PARAMETROS EN ORDEN		
5	NO PRESENTE CODIGOS DE FALLA		

Nota: Si este cuadro no se encuentra diligenciado debe estar anexo el correspondiente ceafeltes impreso

Pecas adicionales no existentes en el ceafeltes de Cummins

PASO	DESCRIPCION	RESULTADO	OK
	N/A	N/A	

Causa raíz encontrada (elemento que genero la falla y su modo de falla)

NO PRESENTE FALLAS

Daños progresivos (consecuenciales)

N/A

Trabajos Realizados para corregir/No falla:

REVISION CON INSITE, REVISION GENERAL MUD FOR

Camión C3

HOJA DE VIDA VEHICULO		PAGINA:	1
		FECHA:	2011/08/24
: Cod. Vehiculo:	SNP-567	Placa	: SNP-567
: Fabric. Nro.:	CHL 2608	Marca	: KENMORTH
: Motor	: ISM 350V	Serie	: 35269604
: Modelo	: T 800	Color	: AMARILLO
: Fecha Venta	: 0000/00/00	Concesionario:	
: Propietario	: CONSTRUCCIONES CIVILES Y PAVIM	Nit o Cedula	: 800016281
: Telefono	: 2382334	Ciudad	: MEDELLIN
O.T. 001-042958 Fecha:2010/06/29 Kms.: 839 Recibido: PAG GONZALEZ SANDOVAL PAOLA Est: CER			
19-602	-018 AJUSTE PARAMETROS ISM	047 I	0.300 0.00
Total Cliente:		0.00	Garan.: 0.00 Int.: 0.00
Observaciones : SNP567 KMS839. INSPECCION INICIAL EN TALLER			
O.T. 001-048300 Fecha:2011/08/17 Kms.: 62,795 Recibido: PAG GONZALEZ SANDOVAL PAOLA Est: CER			
R00001	REFUESTOS	C	1 3,290.00
	3042401 SELLO TAPA ISX		1
99-999	-018 CALIBRACION DE MOTOR	0050 C	6.000 344,520.00
Total Cliente:		347,810.00	Garan.: 0.00 Int.: 0.00
Observaciones : SNP567 KMS62795. CALIBRACION DE MOTOR			
Total Cliente:		347,810.00	Garan.: 0.00 Int.: 0.00



INFORME TECNICO

SER-F-03

VERSION 08

J.T. No: 48300

Placa: SUP-56T

Modelo Motor: IsH

Serie: 35269604

Sintoma reportado por el cliente:

calibracion de Motor

PASO	DESCRIPCION	RESULTADO	OK
1	se encuentra la calibracion de Motor As:		
	1 2 3 4 5 6		
	A 9012 9012 9011 9014 9012 9014	P19	
	E 9020 9019 9028 9025 9020 9027	P01	
	I 100 110 100 120 110 110	γ	
2	se encuentra elucho tubo de escape catalizador de por la temperatura		

Note: Si este cuadro no se encuentra diligenciado debe estar anexo el correspondiente casafaltas impreso

Pasos adicionales no existentes en el casafaltas de Cummins

PASO	DESCRIPCION	RESULTADO	OK
NA			

Causa raíz encontrada (elemento que genero la falla y su modo de falla)

calibracion de Motor

Daños progresivos (consecuenciales)

NA

Trabajos Realizados para corregir la falla:

calibracion de Motor