

**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE
LAS EMISIONES EN RALENTÍ PRODUCIDAS
POR EL TRANSPORTE PESADO DE
PASAJEROS A DIFERENTES ALTITUDES**

Autor

OSCAR ALEXANDER SANDOVAL ROMERO

Directora

CLAUDIA PATRICIA PARRA MEDINA
M.Sc en Ingeniería Mecánica

**PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA,
MECATRÓNICA E INDUSTRIAL
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y
ARQUITECTURA**



Universidad de Pamplona

Pamplona, 7 de julio de 2016

**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE
LAS EMISIONES EN RALENTÍ PRODUCIDAS
POR EL TRANSPORTE PESADO DE
PASAJEROS A DIFERENTES ALTITUDES**

Autor

OSCAR ALEXANDER SANDOVAL ROMERO
1026257707

email: alexandersandovalromero@gmail.com

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:
Ingeniero Mecánico

Directora

CLAUDIA PATRICIA PARRA MEDINA

M.Sc en Ingeniería Mecánica

email: claudypame@gmail.com

**PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA,
MECATRÓNICA E INDUSTRIAL
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y
ARQUITECTURA
UNIVERSIDAD DE PAMPLONA**

Pamplona, 7 de julio de 2016

Dedicatoria

Este trabajo esta dedicado a todos los seres que han influido de manera positiva en mi vida y han promovido un crecimiento espiritual y personal para avanzar en mis objetivos de vida, como comprender la mayor parte del universo y hacer de este algo mejor, entre ellos:

A mi padre Omar Sandoval Guerrero que con su paciencia ha potenciado el instinto de comprender el mundo que de niños todos tenemos, a mi madre María Carlina Romero Ortega por su protección, bienestar y apoyo brindado siempre, a mi abuela María Hermelinda Ortega quien con su amor ha infundado la nobleza en mí, a mi hermano Camilo Andrés Sandoval Romero por sus enseñanzas y ayuda en momentos difíciles, a mi novia Diana Carolina Sierra Valbuena por no dejarme decaer cuando creía que todo estaba perdido, a Claudia Patricia Parra Medina quien con su sincera amistad cristalizó en mí una sólida personalidad.

A la memoria de Sagrario Sandoval Guerrero y Karina Sandoval...

A la gran Energía Universal que siempre me ha guiado hacia grandes oportunidades.

A TODOS, GRACIAS POR CREER EN MÍ.

Agradecimientos

Agradezco a mis padres, abuela y hermanos por sus cuidados durante toda mi vida y la perseverancia para que alcanzara este logro en mi vida.

Agradezco a la docente Claudia Patricia Parra Medina por su tenacidad en la enseñanza, el apoyo al crecimiento personal y permitir espacios para la generación de conocimiento, una maestra ejemplar.

Agradezco a todo el equipo del semillero SEFISOLAR quienes me brindaron ayuda durante el desarrollo de los proyectos en que me involucré: Andrés Mauricio Pinto Castro, Lizeth María Vargas Pérez, Ricardo José Cuberos Pabón, Jessaell Steffan Mendoza Parada, Camilo Andrés Brito Molina, Phd Ariel Rey Becerra Becerra, Diego Alberto Pérez Rivas, Jorge Yesid Parra Medina, Alvaro Andrés Villamizar.

Agradezco a la Universidad de Pamplona por permitir un nuevo capítulo en mi vida y darme herramientas para enfrentar los retos superados.

Contenido

Agradecimientos	VII
Introducción	1
1. EL PROBLEMA	2
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.2. OBJETIVOS	3
1.2.1. OBJETIVO GENERAL	3
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
1.3. JUSTIFICACIÓN	4
1.4. ALCANCES	6
1.5. LIMITACIONES	7
2. ESTADO DEL ARTE	8
2.1. MARCO TEÓRICO	8
2.1.1. Transporte en colombia	8
2.2. TIPOS DE DIESEL	10
2.2.1. Composición del combustible Diesel	12
2.2.2. Caracterización del diesel en colombia	12
2.2.3. Calidad Del combustible	14
2.3. COMBUSTIÓN	16
2.3.1. Reacción estequiometrica de la combustión del Diesel	18
2.3.2. Tipos de combustion	18
2.3.3. Factores que afectan la calidad de la combustión	19
2.3.4. Influencia de la Altitud sobre las emisiones	20
2.4. Gases tóxicos emitidos por los motores diesel	22
2.5. Historia de las mediciones de emisiones	23
2.5.1. Tipos de emisiones en fuentes móviles	24
2.5.2. Elementos mecánicos para control de emisiones	25
2.6. Normas Euro	28

2.6.1.	Métodos de medición de las emisiones del exosto	29
2.6.2.	¿Que se mide en Colombia?	29
2.7.	LEYES Y NORMAS COLOMBIANAS	32
2.7.1.	Medida de la contaminación en ralentí	32
2.8.	Efectos dañinos de las emisiones sobre la salud	33
2.9.	ANTECEDENTES	34
3.	MARCO METODOLÓGICO	36
3.1.	TIPO DE INVESTIGACIÓN	36
3.2.	DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN	36
3.3.	POBLACIÓN	39
3.4.	MUESTRA	39
3.5.	TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN	40
3.5.1.	Fuentes De Información Primarias	40
3.5.2.	Fuentes De Información Secundarias	40
3.6.	INSTRUMENTOS DE MEDIDAS	41
3.6.1.	Instrumentos De Medidas	41
3.6.2.	Analizador de gases Bacharach PCA3	41
3.6.3.	Termómetro digital Unit UT33C	46
3.7.	VARIABLES	47
3.7.1.	Variables independientes	47
3.7.2.	Variables dependientes	48
3.7.3.	Variables intervinientes	49
3.8.	METODOLOGÍA	50
3.9.	DISEÑO DEL EXPERIMENTO	53
3.9.1.	Ruta para la toma de datos	54
3.9.2.	Toma de datos	55
3.10.	VALIDEZ Y CONFIABILIDAD	59
4.	ANÁLISIS Y RESULTADOS	60
4.1.	ANÁLISIS DE DATOS	60
4.1.1.	Codificación de los vehículos para su fácil interpretación	62
4.1.2.	Variación de los parámetros medidos bajo iguales condiciones	63
4.1.3.	Comparativa entre marcas y sistemas	65
4.1.4.	Cambios a partir de la Resolución 1111 de 2013	66
4.1.5.	Valores de contaminantes en motores a gasolina Vs motores diesel medidos	68
4.2.	ANÁLISIS DE DATOS	70

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	77
5.1. CONCLUSIONES	77
5.2. RECOMENDACIONES	79
A. Tablas de cada vehículo medido	80
A.1. SCANIA EURO IV	80
A.1.1. Bus código SBL1	80
A.1.2. Bus código SBO1	81
A.1.3. Bus código SBL2	81
A.1.4. Bus código SBO2	82
A.1.5. Bus código SBL3	82
A.1.6. Bus código SCO1	83
A.1.7. Bus código SBL4	83
A.1.8. Bus código SBO3	84
A.1.9. Bus código SBL5	84
A.1.10. Bus código SBL6	85
A.1.11. Bus código SBL7	85
A.1.12. Bus código SBL8	86
A.1.13. Bus código SCO2	86
A.2. CHEVROLET EURO IV	87
A.2.1. Bus código CBL1	87
A.2.2. Bus código CBR1	87
A.2.3. Bus código CBR2	88
A.2.4. Bus código CBL2	88
A.2.5. Bus código CBL3	89
A.2.6. Bus código CBL4	89
A.3. OTROS VEHÍCULOS	90
A.3.1. Bus código OCCO1	90
A.3.2. Bus código OCCO2	90
A.3.3. Bus código OSBR1	91
A.3.4. Bus código OVOM1	91
A.3.5. Bus código OSCO2	92
A.3.6. Bus código OCBL3	92
A.3.7. Bus código OCOM4	93
A.3.8. Bus código OCBL5	93
A.3.9. Bus código OCCO6	94
Bibliografía	95

Lista de Figuras

1-1. Emisiones de un bus cuando atraviesa la ciudad de Pamplona.	6
2-1. Utilización de diesel en transporte público en Colombia. Tomado de:[34]. .	11
2-2. Utilización de diesel en transporte particular en Colombia. Tomado de:[34].	11
2-3. Contenido de azufre en muestras tomadas en Cartagena. Tomado de:[11]. .	13
2-4. Contenido de azufre en muestras tomadas en Bogotá. Tomado de:[11]. . . .	14
2-5. Evolución del contenido de azufre en el diesel para Colombia. Tomado de:[4].	15
2-6. Evolución de la calidad de la gasolina para Colombia. Tomado de:[4]. . . .	15
2-7. Reacción química de la combustión de un hidrocarburo. Tomado de: [20]. .	18
2-8. Red de cordilleras que finalizan en nuestro país. Tomado de:[23].	20
2-9. Modelo digital de las cordilleras Colombianas. Tomado de:[12].	21
2-10.Catalizador. Tomado de: [24]	26
2-11.Sistema EGR. Tomado de:[24]	26
2-12.Sistema Ad Blue. Tomado de:	27
2-13.Inyección de urea diluida en el sistema de escape . Tomado de:[8]:.	28
2-14.Contaminación en ralentí. Tomado de:[14]	33
3-1. Analizador de gases marca Bacharach modelo PCA 3 275, utilizado en este proyecto. Tomado de: El autor.	41
3-2. Vista frontal y lateral del analizador. Tomado de:[5].	42
3-3. Vista interna del analizador de gases marca Bacharach modelo PCA 3 275, utilizado en este proyecto. Tomado de:[5].	43
3-4. Posición de los sensores del analizador de gases marca Bacharach modelo PCA 3 275, utilizado en este proyecto. Tomado de:[5].	44
3-5. Conexión del analizador de gases marca Bacharach modelo PCA 3 275, utilizado en este proyecto. Tomado de:[5].	45
3-6. Precisión del analizador de gases marca Bacharach modelo PCA 3 275, utilizado en este proyecto. Tomado de:[5].	46
3-7. Multímetro digital Unit UT33C, utilizado en este proyecto. Tomado de:[33].	47
3-8. Altimetría de la ruta Bogotá-Cúcuta. Tomado de: maps.	48

3-9. Variación de la temperatura de los gases de escape para 13 buses Scania. Tomado de: El autor.	49
3-10. Metodología propuesta. Tomado de: El autor.	51
3-11. Mapa de la ruta donde se realizaron las medidas. Tomado de: El autor. . .	55
3-12. Registro de los datos en el analizador. Tomado de: El autor.	56
3-13. configuración del analizador para la toma de datos. Tomado de: El autor. .	57
3-14. Estabilización del aparato durante la toma de datos. Tomado de: El autor. .	57
3-15. Finalización de la medición con el analizador. Tomado de: El autor.	58
3-16. Registro de los buses encontrados. Tomado de: El autor.	58
4-1. Características de Scania K360. Tomado de: [32]	61
4-2. Características de motor Chevrolet. Tomado de: [9]	61
4-3. Variaciones para una misma altitud. Tomado de: El autor.	63
4-4. Variaciones de temperaturas de escape y emisiones para una misma altitud en motores chevrolet. Tomado de: El autor.	64
4-5. Comparativa de marcas y sistemas de control de emisiones. Tomado de: El autor.	65
4-6. Comparativa de marcas y sistemas CHEVROLET antes y después del de- creto 1111 de 2013. Tomado de: El autor.	67
4-7. Comparativa entre sistemas SCANIA antes y después del decreto 1111 de 2013. Tomado de: El autor.	68
4-8. Valores de contaminación, Chevrolet luv. Tomado de: El autor.	69
4-9. Valores de contaminación, Renault 9 . Tomado de: El autor.	70
4-10. Morbilidad y mortalidad causada por la contaminación ambiental en co- lombia. Tomado de: [6].	72
4-11. Interfaz de trabajo del software EVIEWS versión 8. Tomado de: El autor. .	73
4-12. Estimación de la ecuación para los valores de monóxido de carbono en función del de la altitud y la temperatura los gases de escape. Tomado de: El autor.	73
4-13. Análisis de residuos utilizando caja de bigotes. Tomado de: El autor. . . .	74
4-14. Resultados calculados por el software EVIEWS. Tomado de: El autor. . . .	75
4-15. Histograma de residuos. Tomado de: El autor.	75
4-16. Gráfica generada con la ecuación calculada. Tomado de: El autor.	76

Lista de Tablas

2-1. Normativa Euro para motores diesel	29
2-2. Parámetros contaminantes medidos en Colombia	30
2-3. Valores máximos de monóxido de carbono (CO) e hidrocarburos, para vehículos con motores a gasolina en Colombia	31
2-4. Valores máximos de monóxido de carbono (CO) e hidrocarburos, para vehículos con motores movidos con GLP en Colombia. Tomado de:[3].	31
2-5. Valores máximos de monóxido de carbono (CO) e hidrocarburos, para mo- tocicletas cuatro tiempos en Colombia. Tomado de:[3]	32
2-6. Add caption	32
2-7. Valores máximos de opacidad para vehículos con motor Diesel en Colombia. Tomado de:[3].	32
3-1. Especificaciones de precisión. Tomada de [33].	47
3-2. Actividades propuestas para cada objetivo. Tomado de: El autor.	53
4-1. Codificación de los buses para su posterior análisis.	62
A-1. Bus SBL1	80
A-2. Bus SBO1	81
A-3. Bus SBL2	81
A-4. Bus SBO2	82
A-5. Bus SBL3	82
A-6. Bus SCO1	83
A-7. Bus SBL4	83
A-8. Bus SBO3	84
A-9. Bus SBL5	84
A-10Bus SBL6	85
A-11Bus SBL7	85
A-12Bus SBL8	86
A-13Bus SCO2	86
A-14Bus CBL1	87

A-15Bus CBR1	87
A-16Bus CBR2	88
A-17Bus CBL2	88
A-18Bus CBL3	89
A-19Bus CBL1	89
A-20Bus OCCO1	90
A-21Bus OCCO2	90
A-22Bus OSBR1	91
A-23Bus OVOM1	91
A-24Bus OSCO2	92
A-25Bus OCBL3	92
A-26Bus OCOM4	93
A-27Bus OCBL5	93
A-28Bus OCCO6	94

Lista de símbolos

Abreviaturas

Abreviatura	Término
<i>(DOC)</i>	Catalizador oxidativo para vehículos diesel
<i>(SCR)</i>	Sistema de reducción con catálisis selectiva
<i>(EGR)</i>	Recirculación de los gases de escape
<i>CO</i>	Monóxido de carbono
<i>NO</i>	Monóxido de nitrógeno
<i>NO_x</i>	Óxidos de nitrógeno
<i>SO_x</i>	Óxidos de azufre
<i>T – Stk</i>	Temperatura de los gases de escape
<i>T – Air</i>	Temperatura del aire
<i>O₂</i>	Óxígeno
<i>HC</i>	Hidrocarburos
<i>PM</i>	Material particulado

Introducción

En este proyecto de investigación se determinó el efecto que la altitud tiene sobre las emisiones de motores diesel de transporte pesado de pasajeros operando en Colombia, específicamente desde Pamplona por la ruta 66 hacia Bucaramanga y desde Pamplona por la ruta 55 hasta Cúcuta. Las medidas de las emisiones se tomaron a diferentes altitudes y en marcha mínima o ralentí, a fin de determinar la influencia de las diferentes condiciones de funcionamiento que se modifican cuando se varía la altura sobre el nivel del mar, donde las más relevantes son la concentración de oxígeno, la temperatura y la presión atmosférica.

En el desarrollo de este proyecto se planteó estudiar vehículos de transporte público pesado, dado que son los que más kilómetros recorren en nuestro país y los que se presumen responsables de gran parte de las emisiones contaminantes, específicamente se evaluarán buses interdepartamentales ya que estos motores tienen condiciones de funcionamiento más estables y con cargas moderadas, lo que contribuye a dar una visión imparcial de las emisiones en ralentí.

El transporte pesado de carga que maneja un peso bruto vehicular de hasta 53 toneladas no ofrece una medida imparcial de las emisiones en ralentí pues por las condiciones topográficas de Colombia se encuentran sobre-cargados; los vehículos diesel livianos tampoco dan un buen panorama pues casi siempre están sub-cargados, por este motivo se eligen los buses de transporte interdepartamental que manejan pesos brutos vehiculares de aproximadamente 17 toneladas, esta selección también es importante cuando se va medir en ralentí porque a pesar de que en el momento del registro el vehículo no se encuentra en movimiento, el uso que se le ha dado al motor con anterioridad influye en los valores de emisiones medidos en ralentí. Según la ley colombiana a partir de 2015 solamente se permite la comercialización de vehículos nuevos con motor diesel que cumplan con la normativa Euro IV, lo cual limitó aún más el grupo de vehículos a estudiar. De igual manera se compararon las mediciones para motores diesel en ralentí con valores en motores de gasolina y de esta forma se determinará en condiciones reales de funcionamiento qué combustible contamina más según las variables medidas y comparadas.

Capítulo 1

EL PROBLEMA

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Actualmente en el mundo se vive una crisis ambiental debido a la quema de combustibles fósiles, que a lo largo del siglo XX se vio incrementada por la utilización de motores de combustión interna que usan derivados del petróleo como fuente de energía para calentar el aire de manera rápida durante el ciclo de expansión; los sistemas de transporte se desarrollaron alrededor de estos combustibles y como consecuencia de esta hegemonía la industria también adoptó la quema de combustibles fósiles como fuente predominante de energía para su posterior transformación y utilización en la cadena productiva.

Según [27], “la contaminación del aire, se considera un serio problema ambiental debido a la presencia en la atmósfera de materiales peligrosos, tales como, metales e hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) presentes en el material particulado (PM). Los (HAPs) son contaminantes prioritarios del aire, por sus propiedades extremadamente peligrosas para la salud humana” y en el mundo entero existen organizaciones que buscan detener los efectos adversos que sobre la salud y el planeta tienen estos desechos de combustión, pero el problema no se ha tratado de forma adecuada, a tal punto, que no se tienen registros en cuanto a emisiones en condiciones de funcionamiento reales y la diferencia que éstos tienen con los datos publicados por los fabricantes. Esta situación se ha venido manejando de manera cualitativa, lo que limita el poder de acción de los gobiernos y los departamentos de diseño mecánico al momento de hacer modificaciones para disminuir los niveles de emisiones perjudiciales. Se sabe que las emisiones por combustión, son tóxicas para nuestro organismo y otros seres vivos, pero no se tienen cifras concretas que indiquen cuánto están contaminando estos motores, actualmente la falta de información clara y confiable sobre este problema no ha permitido su control lo que genera errores en las políticas públicas y retrocesos cuando la ingeniería no sabe hacia dónde ir en el desarrollo de tecnologías que controlen las emisiones contaminantes.

No basta con que algunas instituciones creen normas que limiten la cantidad de contaminantes emitidos, también se debe monitorear de manera real si difieren o no de los valores estipulados como máximos y cuantificar esas diferencias para que sea más fácil determinar que sistemas de control de emisiones son más eficientes y bajo qué condiciones de funcionamiento se deben utilizar; así como las variables específicas que afectan los valores medidos, que en el caso de nuestro país al no tener una industria consolidada que desarrolle tecnología propia, se presentan inconvenientes relacionados con las especificaciones para las que fueron diseñados estos motores, pues la mayoría fueron pensados para condiciones topográficas menos fuertes que las nuestras, [36], por lo que aquí trabajan en condiciones extremas, según [30] y [28], con diferencias de altitud considerables respecto a las distancias recorridas, tal es el caso del tramo Cúcuta–Pamplona, en el que en menos de 70 kilómetros se debe ascender 2000 metros cambiando por completo las condiciones de trabajo del motor a las cuales deben adaptarse sus sistemas eléctricos, electrónicos y mecánicos para compensar estos cambios sin emitir contaminantes en exceso, pero.

¿Hasta qué punto los sistemas del vehículo son capaces de reacondicionarse en ralentí, teniendo en cuenta otro factor importante como la calidad del combustible ofertado?

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVO GENERAL

Estimación del comportamiento de las emisiones en ralentí producidas por el transporte pesado de pasajeros a diferentes altitudes.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definir el diseño de experimento apropiado para realizar mediciones a diferentes alturas (msnm) de las emisiones de buses interdepartamentales que cubren las rutas desde el norte de Santander.
- Medir en condiciones reales de funcionamiento las emisiones del motor diésel, generadas en ralentí a diferentes altitudes, de buses interdepartamentales que cubren las rutas desde el norte de Santander, mediante el analizador de gases Bacharach PCA3.
- Documentar los resultados de las pruebas dinámicas realizadas por los fabricantes de los motores diésel (Scania y Chevrolet), donde la casa matriz evidencia el

cumplimiento a la normativa Euro IV.

- Analizar y estudiar los resultados de las mediciones del motor diésel, operando en ralentí, de los buses interdepartamentales y que cubren las rutas desde el norte de Santander, cuantificando el efecto que tiene la diferencia de altura sobre los niveles de contaminación.
- Adquirir algunos resultados de pruebas de emisiones realizadas en Colombia por centros de diagnóstico automotor, de motores a gasolina operando en ralentí.
- Comparar los datos obtenidos mediante el analizador de gases Bacharach PCA3 de buses con motor diesel interdepartamentales que cubren rutas desde el norte de Santander y su equivalente con los valores suministrados de motores a gasolina.

1.3. JUSTIFICACIÓN

A lo largo de la historia se ha convivido con la contaminación de distintas formas y con diferentes consecuencias para la humanidad, inicialmente se buscaba el saneamiento de aguas aptas para el consumo y la adecuada conservación de los alimentos combatiendo los agentes patógenos que nos afectan. La contaminación se reducía a los elementos que de manera natural nos afectaban y en aquel entonces no se consideraba relevante los efectos adversos que sobre la naturaleza ejercía la actividad humana. Posteriormente se inicia la revolución industrial y una explosión demográfica significativa lo que implicaba aumentar el consumo energético a niveles cada vez mayores y con una tasa de crecimiento exponencial, la búsqueda de formas de energía de mayor eficiencia y poder llevó a posicionar la quema de combustibles como la principal fuente energética, iniciando con la madera y el carbón que presentan poderes caloríficos de 15 kJ/g y 27 kJ/g respectivamente; pero estos valores fueron suficientes hasta cierto punto y el incremento de las necesidades energéticas obligó a la búsqueda de otras fuentes más poderosas.

El siglo XIX representó el incremento desenfrenado del uso de la energía y el petróleo respaldó este crecimiento con un amplio margen ya que el poder calorífico de sus derivados llega a 47 kJ/g en el caso de la gasolina y 45 kJ/g para el diesel, eso significó aumentar la capacidad de transformar materias primas y cambió radicalmente la forma de consumir recursos, pero conjuntamente se presentaron consecuencias desastrosas al romper el delicado equilibrio entre los ciclos naturales de elementos como el carbono, nitrógeno y ozono entre otros. Dentro de las necesidades del mundo actual, el transporte es uno de los aspectos más relevantes y que determina las ventajas comparativas de un productor frente a otro, por este motivo se buscan medios de transporte para carga y pasajeros más rápidos y

eficientes tanto para el cliente como para el ofertante de este servicio.

La quema de los combustibles de origen fósil ha liberado inmensas cantidades de carbono al ambiente, que se encontraban confinadas en la tierra y que no representaban una amenaza, este cambio ha acelerado los ciclos que de manera natural siempre se han dado en el planeta. Otro efecto negativo es la alta concentración de compuestos tóxicos para nuestro cuerpo como el monóxido de carbono (CO) y los óxidos de nitrógeno (NO_x) que afectan los pulmones y generan combinaciones en la atmósfera que dan como resultado ácida.

Se planea medir la influencia de la diferencia de altura sobre los niveles de contaminación en marcha mínima de los motores diesel porque es un paso necesario en la búsqueda de soluciones al grave problema de contaminación que actualmente vive nuestro planeta y específicamente nuestras ciudades, que se ven afectadas por el paso de vehículos contaminantes todos los días, sin que se tomen medidas efectivas para contrarrestar los efectos nocivos que sobre la vida tienen las emisiones contaminantes de los motores de combustión interna en general. En nuestro país no se realizan medidas de las mismas variables para motores a gasolina y motores diesel, específicamente para motores diesel en la práctica solamente se mide la opacidad en ralentí como variable cuantificadora de la contaminación lo que impide tener un panorama claro de los niveles de contaminación.

En este trabajo se medirán otras variables como monóxido de carbono (CO), oxígeno (O) y óxidos de nitrógeno (NO_x) en ralentí porque es un método no implementado en Colombia que facilita la forma de medir y no requiere de equipos robustos y costosos, otro motivo para elegir este método es que el Laboratorio de Energía solar de la Universidad de Pamplona cuenta con el equipo analizador de gases Bacharach PCA3, el cual permite medir las cantidades antes mencionadas y con el cual se harán las mediciones.

Con una cuantificación clara y precisa de las emisiones se pueden iniciar otros estudios en muchas ramas de la ciencia como la química, biología, física, entre otras, que lleven a una solución parcial desde la academia conjuntamente con las administraciones, analizando nuestras propias condiciones y necesidades ya que no siempre las políticas ambientales ni los desarrollos de la ingeniería funcionan en nuestro caso, debido a las difíciles condiciones topográficas y el casi nulo avance en cuanto a combustibles limpios se refiere, por estos motivos principalmente se deben evaluar las emisiones contaminantes en condiciones reales de funcionamiento y en nuestro país.

También se busca comparar las emisiones en marcha mínima de los motores diesel medidos, contra los resultados de motores a gasolina para determinar cuál contamina más en condiciones de ralentí. Este proyecto beneficia las comunidades asentadas en zonas

con alto flujo vehicular de buses con motores diésel, ya que al cuantificar las emisiones en ralentí se tendrá una base para diseñar políticas de movilidad que lleven a una mejor calidad de vida de los miembros de estas comunidades, así como la implementación de medidas que definan que métodos de disminución de contaminantes son más eficaces en nuestro entorno. La Figura 1-1 muestra la emisión de gases que dejan estos buses al pasar a través de la ciudad de Pamplona.



Figura 1-1: Emisiones de un bus cuando atraviesa la ciudad de Pamplona.

1.4. ALCANCES

Con la ejecución de este proyecto se pretende cuantificar el efecto de la altitud sobre las emisiones contaminantes en ralentí de motores diesel utilizados por vehículos de transporte pesado de pasajeros que cubren rutas desde Pamplona por la ruta 55 hasta Cúcuta y desde Pamplona por la ruta 66 hacia Bucaramanga, hasta siempre en condiciones reales de funcionamiento y aplicado de la siguiente manera: midiendo en ralentí los niveles de contaminación y luego realizar otras mediciones similares con variaciones de altitud considerables y representativas de nuestro país, con lo que pretendemos se inicien nuevas investigaciones que hagan seguimiento a estos resultados y/o se determinen las variables más relevantes a controlar en el contexto nacional.

1.5. LIMITACIONES

Ya que la forma de medir contaminantes emitidos por motores es tan variada, tanto que no existe un consenso mundial al respecto, una de las limitaciones principales es no poder hacerlo con otros métodos para evaluar la pertinencia de los mismos en nuestro país, esto se debe a falta de equipos de mayor capacidad que permitan medir otras variables, en diferentes condiciones de funcionamiento, por lo general los fabricantes realizan estas pruebas en sus países de origen.

Otra limitación importante es la actitud reacia que han presentado algunas empresas de transporte interdepartamental de pasajeros, para la medición de sus vehículos, pues lo pueden interpretar como una amenaza que dañaría su imagen corporativa.

En cuanto a recursos económicos también se presentan limitaciones, esto lleva a realizar una planeación eficiente de los desplazamientos requeridos para tomar las mediciones y evitar desperdicios, la calibración del equipo de medición también juega un papel importante ya que existen un número finito de mediciones confiables antes de recalibrar sus sensores.

Capítulo 2

ESTADO DEL ARTE

2.1. MARCO TEÓRICO

2.1.1. Transporte en colombia

2.1.1.1. Historia del transporte por carretera en colombia

A lo largo de nuestra historia el transporte ha jugado un papel fundamental en el desarrollo de nuestro país, en sus inicios se consideró el transporte como la forma de llevar cargas de un sitio a otro, cargas que difícilmente podía llevar un ser humano, mientras que la movilidad de viajeros se realizaba de forma rústica, a pie o en algunos animales domesticados. Al llegar la época de la conquista los modos de transporte cambiaron de forma drástica por la necesidad de movilizar grandes cargas de elementos diferentes a los alimentos que cotidianamente eran transportados, como principal cambio se introdujo el uso del caballo para mover carga y personas de manera más rápida pero con menor confiabilidad por las difíciles condiciones geográficas que se presentaban.

Las primeras ciudades fueron localizadas bajo los preceptos que se creían adecuados para esos tiempos pero sin una correcta planeación hacia el futuro, sin prever el crecimiento que tendrían por la condición de ciudad principal de la región geográfica cuasi aislada, los intereses que incentivaron la ubicación de las poblaciones estaban determinados por la riqueza en metales y minerales preciosos en su cercanía dejando en segundo plano el desarrollo social sostenible en el tiempo que garantizara ciudades estables y sin problemas de fondo como riesgos ambientales o falta de recursos para su sostenimiento o comunicación terrestre adecuada. Cuando se definió de manera general los principales asentamientos fue necesario adecuar los caminos existentes y casi nulos por los que transitaban pequeños grupos de transportistas ya sea solos o con recuas de mulas principalmente, años después estos caminos de herradura fueron insuficientes para suplir la necesidad de materias requeridas en el mercado interno y su conexión con la zona costera para el ingreso de productos

extranjeros. En este punto de la historia se ampliaron los caminos para permitir el paso de pequeños carruajes capaces de incrementar la capacidad de carga existente. Por condiciones que se trataran en el siguiente sección, esta situación difícil e ineficiente respecto al transporte se mantuvo vigente por alrededor de 400 años, solamente con pequeños cambios superficiales y sin grandes planes para mejorar la infraestructura ya que la capacidad para realizar obras era limitada por la fuerza humana y los recursos como siempre eran escasos por la falta de condiciones que ayudaran a generar riqueza, convirtiéndose en un círculo vicioso del que hasta ahora estamos saliendo.

A principios del siglo XX en Europa se introdujo la más revolucionaria máquina para generar trabajo y potencia que permitiría recorrer grandes distancias utilizando una fuente de energía fácil de transportar y con un poder calorífico alto, el motor de combustión interna, que al ser adaptado a los carruajes de la época cambiaría para siempre la forma de moverse en el mundo y a la vez reformaría el concepto de distancias acercando cada vez más los sitios que se creían aislados ente sí. En Colombia los primeros vehículos con motor de combustión interna llegaron por los años 1920 acelerando el crecimiento como se describe en el artículo sobre el libro, de la mula al camión: “ En 1936 los hermanos Demetrio y Luis Correa hacen su último viaje de arrieros y en San Cristobal, Venezuela, venden sus mulas. Moría allí, toda una tradición y un servicio, para dar paso al transporte terrestre automotor. En efecto, a su regreso compran camiones a razón de 700 pesos cada uno y se dedican de manera independiente al transporte en la zona del Tundama.

Ya por esa época existían algunas empresas de transporte de pasajeros: La Terrestre, con buses Brokuaid cubría la ruta Bogotá-Belén, en 1942 aparece en transportes Cúcuta, para cubrir la ruta Bogotá-Cúcuta, desarrollando este corredor vial tan importante para nuestro país y en el que se ubica la ruta donde se desarrolla este trabajo investigativo. El 15 de julio de 1942 se funda Transbolívar S.A., con sus servicios de pasajeros y carga. Nadie imaginaba que esta empresa se convertiría en la madre del transporte más importante del occidente del país.

La primera importación de chasises y camiones por parte de Transbolívar S.A. se efectúa en este año, dando lugar a varios problemas técnicos causados por las precarias condiciones en las que debían rodar estos vehículos, entre ellas se destaca, combustible de mala calidad, trochas difíciles, y la topografía Colombiana que en principio ocasionaba pérdidas de rendimiento y disminución de las ganancias, pero al mismo tiempo determinó la calidad de combustión y niveles de emisiones generados, aunque en ese momento no se consideraba un tema importante pues para los transportadores cualquier método que aumentara el rendimiento del motor era válido sin importar los daños que a la salud y el ambiente causarían sus vehículos.

En 1947 Transbolívar traslada la gerencia a Bogotá e inaugura sus rutas Bogotá-Bucaramanga-Barrancabermeja-Maicao-Santa Marta-Cartagena. Ya para este año, la industria del transporte empezaba a generar un comercio diferente al tradicional en Duitama, comercio para suplir las necesidades de repuestos e insumos para el gremio del transporte.

En las décadas 40 y 50 los vehículos particulares ya eran comunes en las ciudades y las normas buscaban reglamentar las condiciones de rodaje sin tener en cuenta aún la contaminación como un factor importante, cabe aclarar que la mayoría de vehículos utilizaban como combustible la gasolina, estas condiciones se mantuvieron hasta la década de los 90 donde ya aparecían vehículos movidos con motor diesel y se promovía su utilización con un precio por galón mucho menor que el de la gasolina, así finalizó el siglo XX para el transporte de pasajeros y sin políticas claras sobre la contaminación que que el transporte terrestre generaba.

Finalmente, en el siglo XXI se ha tomado las emisiones contaminantes de las fuentes móviles como un tema importante, introduciendo al país tecnologías en los motores que contribuyen a disminuir esos niveles, que junto a la mejora en carreteras y en combustibles permite aumentar el rendimiento de los vehículos quemando menos combustible para realizar el mismo trabajo y aunque falta mejorar muchos aspectos del transporte y políticas en materia de contaminación se vislumbra un futuro cada vez mejor.

2.2. TIPOS DE DIESEL

En el mercado se encuentran muchos tipos de combustible diesel pero para transporte terrestre se agrupan en tres categorías principalmente:

- ***Para ciudad o City Diesel.*** Es utilizado para transporte urbano y automóviles.
- ***El diesel para carretera (On road Diesel).*** Lo usan para vehículos interdepartamentales y que recorren grandes distancias en carretera.
- ***Y el diesel para equipos fuera de ruta (Off Road Diesel).*** Usado en minería, construcción, en algunas labores agrícolas, motores estacionarios, entre otros.

Químicamente las diferencias entre los tres tipos de diesel se concentran en el contenido de azufre y el rango de destilación. El City Diesel tiene menor contenido de azufre y un mayor cetano, es más liviano y su punto final de ebullición es hasta 30 a 40 grados Celsius más bajo. Le siguen en su orden el diesel para carretera: éste es más pesado, normalmente tiene más azufre y un punto final de ebullición del orden de 370-390 grados Celsius.

Finalmente el diesel para equipos fuera de carretera que puede ser más pesado, contener más azufre y mayor rango de destilación.

En Colombia la utilización del combustible diesel se ha incrementado en los últimos veinte años de manera vertiginosa gracias a las ventajas descritas anteriormente, en la Figura 2-1 se evidencia la hegemonía del combustible diesel en el transporte público en Colombia, con un 67% frente al 32% de gasolina.

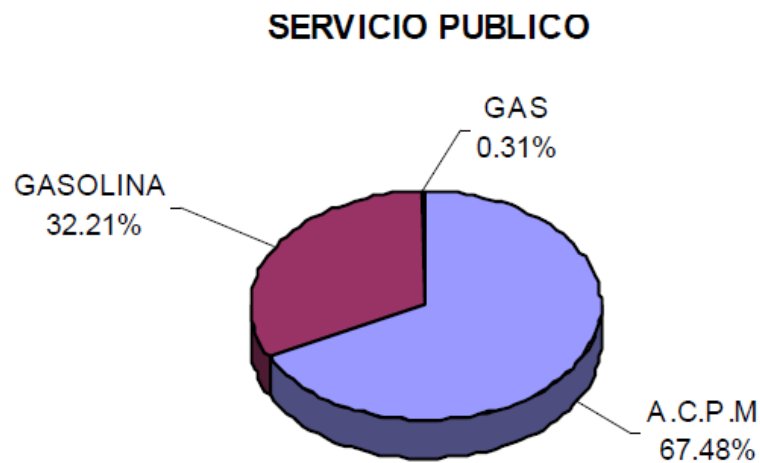


Figura 2-1: Utilización de diesel en transporte público en Colombia. Tomado de:[34].

En la Figura 2-2 se muestran los porcentajes de utilización del combustible diesel en el servicio particular, donde la gasolina prima con un 71% y el diesel un 28%, un pequeño porcentaje se lo lleva el gas natural alcanzando solamente el 1%.

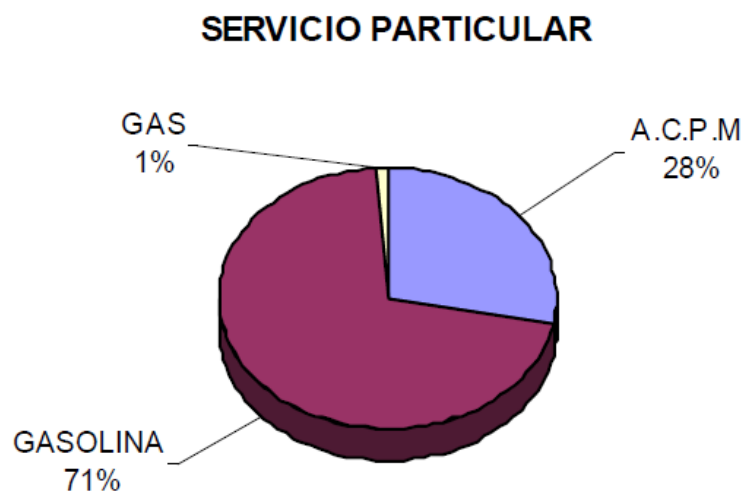


Figura 2-2: Utilización de diesel en transporte particular en Colombia. Tomado de:[34].

Esto se explica debido a que en el transporte particular o privado por las incomodidades que pueden generar los motores diesel en su funcionamiento como mayor ruido que el motor de gasolina, producción de hollín y en algunos casos extremos mayores dificultades al encendido en frío que el motor a gasolina, los compradores prefieren el motor a gasolina pero a nivel mundial esta tendencia esta cambiando, ya que en algunos países de Europa se tienen porcentajes de hasta un 80 % de utilización de combustible Diesel.

2.2.1. Composición del combustible Diesel

En general se puede decir que el combustible diesel es más pesado que la gasolina, es decir sus moléculas componentes son más grandes y complejas. Mientras en la gasolina hay moléculas con 4 hasta 12 carbono, en el diesel las moléculas componentes pueden tener hasta 25 átomos de carbono.

Esto implica, entre otras cosas que el diesel es más difícil de atomizar, esta es la principal razón por la cual el diesel tiende a generar más humo, partículas de carbón o combustible parcialmente quemado. También implica que el diesel requiere mayor cantidad de oxígeno para que la mezcla sea eficiente y la combustión resulte lo más completa posible. El diesel tiene mayor densidad energética que la gasolina y por lo tanto puede desarrollar mayor potencia en los motores, por esto es más utilizado para máquinas de trabajo pesado donde se requiere mayor torque, no obstante el motor diesel también es utilizado en automóviles pequeños, especialmente en Europa por el mayor rendimiento que presenta.

2.2.2. Caracterización del diesel en colombia

En el “Informe de resultados análisis de las muestras de Diesel corriente y extra y gasolina corriente y extra de las plantas de ECP, tanques mayoristas y EDS en las principales ciudades de Colombia - Agosto de 2013.” se presentan los resultados de la caracterización del combustible en Colombia, donde la principal característica que se tomo en cuenta y que determina un combustible de calidad internacional es el contenido de azufre.

Este estudio se realizó en las principales ciudades del país durante agosto de 2013 bajo la norma ASTM D 2622-10 donde para el caso específico del diesel se tomaron 54 muestras entre tanques de Ecopetrol y de mayoristas y obteniendo un promedio en contenido de azufre de 21 partes por millón, estos resultados corroboran que la calidad de combustible en Colombia ha venido mejorando en los últimos años pasando de 3000 partes por millón a unas 50 partes por millón, se espera que en los años siguientes, se mejore aún más la calidad y los procesos de refinación sean más eficientes para obtener la mayor cantidad de combustible a un menor costo, de esta manera la incursión de nuevas tecnologías respecto a los motores podrán ser traídas a nuestro país y de esta manera optimizar el transporte

pesado de pasajeros con los niveles más bajos de emisiones contaminantes.

En la Figura 2-3 se aprecia una de las muestras con contenido de azufre por encima de la especificación impuesta por el estado Colombiano en el marco del proyecto para buscar combustibles más limpios en nuestro país, esta muestra se tomó en la ciudad de cartagena, donde la barra verde representa una muestra tomada de los tanques pertenecientes a Ecopetrol y las barras azul, morado, gris y café representan las muestras recolectadas en los tanques de distribuidores mayoristas, donde una de ellas supera el valor de referencia de 50 partes por millón de contenido de azufre.

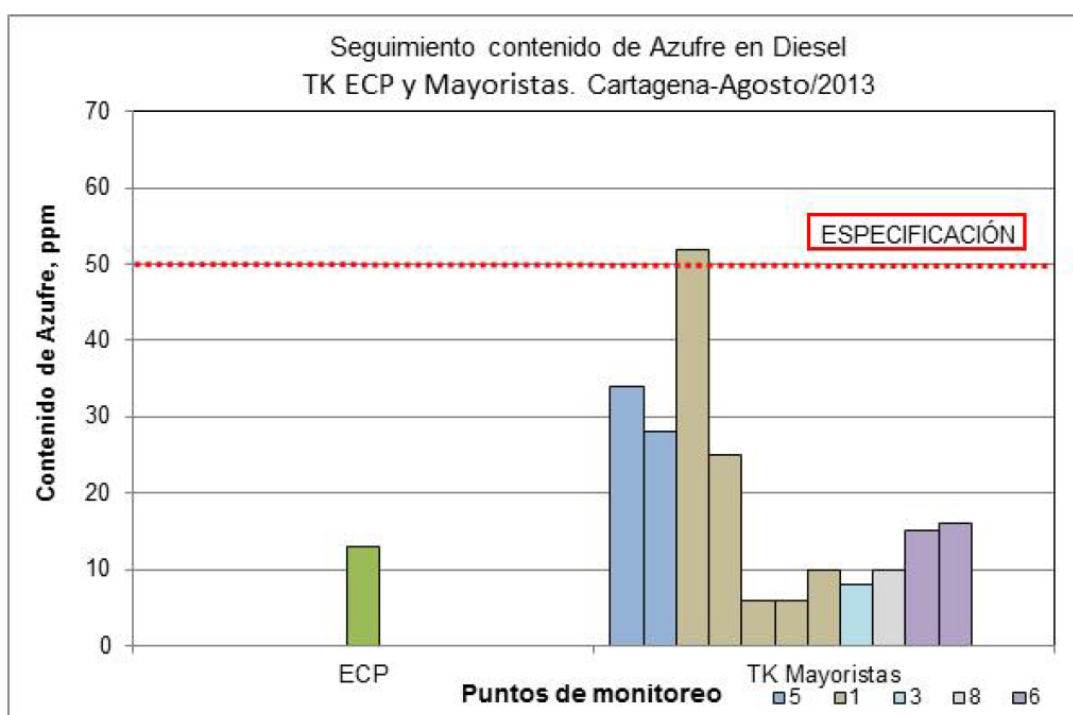


Figura 2-3: Contenido de azufre en muestras tomadas en Cartagena. Tomado de:[11].

En la Figura 2-4 se aprecia varias muestras tomadas en la ciudad de Bogotá donde se diferencian los tanques de Ecopetrol con barras verdes y de mayoristas con los colores restantes. Esta figura de las muestras tomadas en la ciudad de Bogotá, tiene importancia por ser la capital, ciudad hacia dónde se dirigen la mayoría de las rutas desde sitios apartados y desde donde la mayoría de empresas de transporte envían sus rutas y tienen sus sedes principales.

Bogotá también es una ciudad importante en cuanto a niveles de contaminación debido a la gran cantidad de personas que alberga que actualmente supera los siete millones, esta

cifra hace más delicado y el equilibrio entre productividad y niveles de emisión contaminante, tan crítico es que en un comunicado de la secretaría de salud de Bogotá se atribuían la muerte de 50 niños al año a causa de enfermedades respiratorias, generadas específicamente por los contaminantes emitidos durante el funcionamiento de motores Diesel, por este motivo iniciaron varios proyectos que buscaban mejorar la calidad del combustible para la ciudad capital y principalmente es que era consumido por el sistema de transporte masivo Transmilenio, [11].

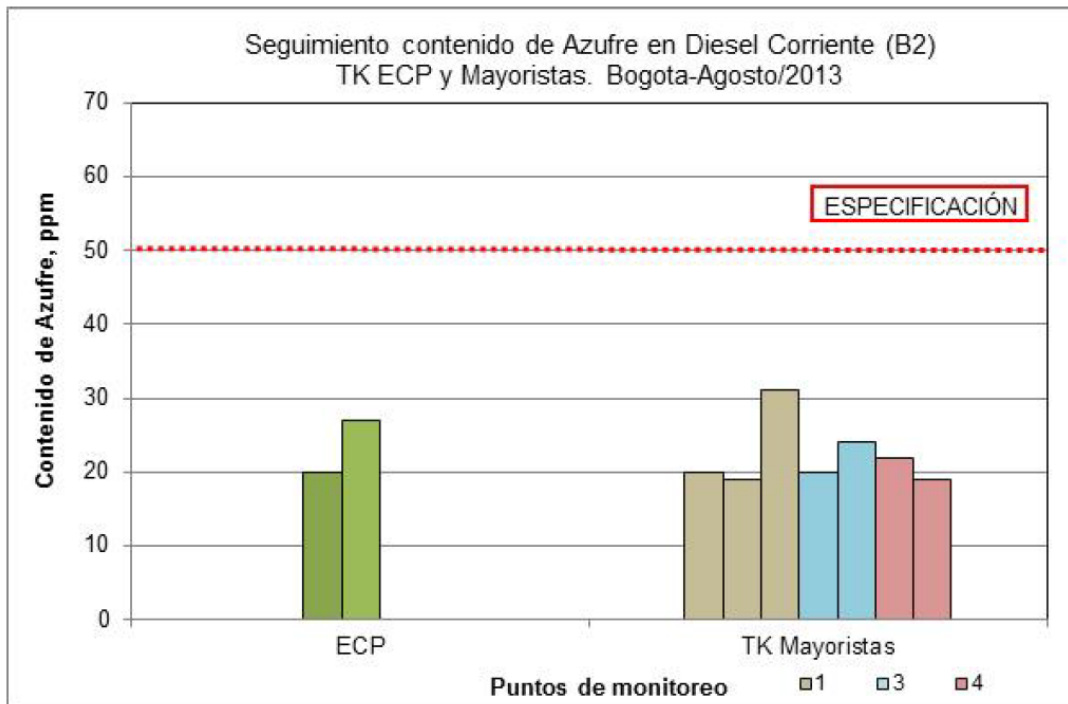


Figura 2-4: Contenido de azufre en muestras tomadas en Bogotá. Tomado de:[11].

2.2.3. Calidad Del combustible

Según el estudio realizado en 2013 por Jorge Arango,[4], sobre la calidad de los combustibles en Colombia específicamente para el combustible diesel, a lo largo de las dos últimas décadas Ecopetrol ha hecho esfuerzos para mejorar la calidad, motivado también por la entrada en operación del sistema transporte masivo en Bogotá al cual se le suministraba diesel con un contenido de azufre de 1200 ppm cuando el diesel que se expendía a nivel nacional contenía 3000 ppm de azufre, uno de los cambios más significativos fue la reducción del punto final de destilación pasando de 380 grados centígrados a 360 grados centígrados, impidiendo de esta manera que las fracciones pesadas se incluyeran en el producto final, a partir del año 2008 se empezó a distribuir en la capital combustible diesel con menos

de 500 ppm. de azufre.

En Colombia se ha venido mejorando la calidad de los combustibles en los últimos 20 años, pasando de niveles de azufre de 3000 partes por millón (ppm) a menos de 40 ppm en el año 2013 y se proyecta que para finales de la década y con la entrada en funcionamiento de la refinería de Cartagena (REFICAR) se llegue a niveles de 10 ppm, según [4]. En las Figuras 2-5 y 2-6 se puede observar la evolución en la calidad del combustible diesel y la gasolina respectivamente.

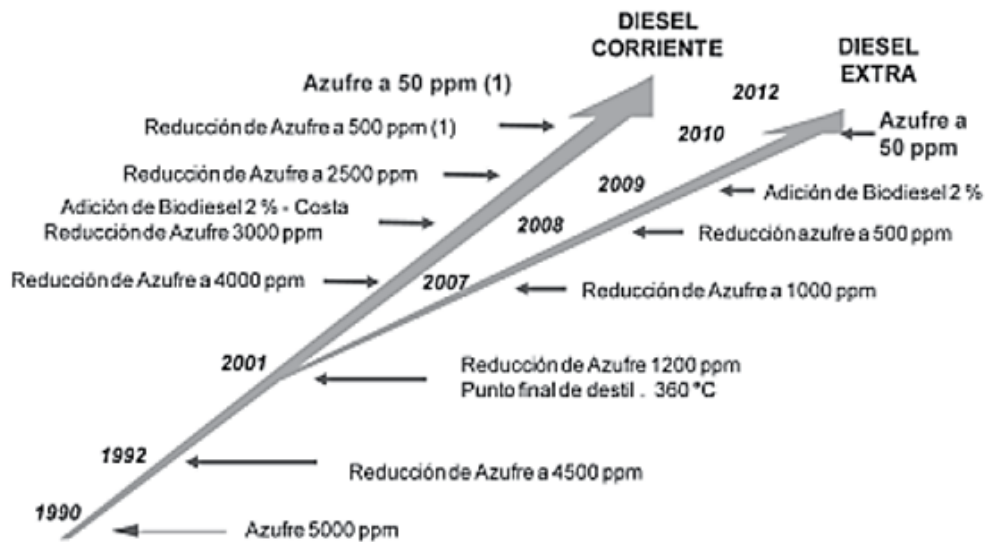


Figura 2-5: Evolución del contenido de azufre en el diesel para Colombia. Tomado de:[4].

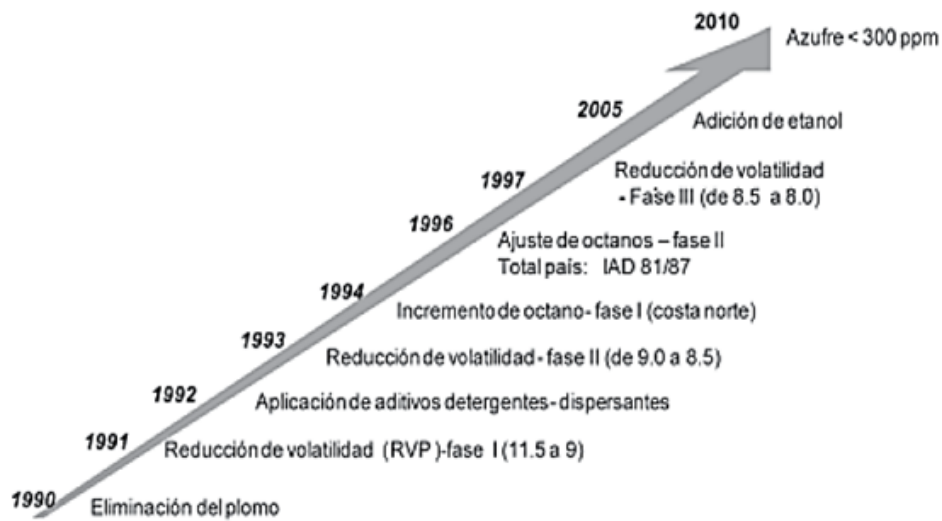


Figura 2-6: Evolución de la calidad de la gasolina para Colombia. Tomado de:[4].

2.3. COMBUSTIÓN

Se define la combustión como la reacción química entre un combustible y el oxígeno, en la cual se libera energía que puede ser transformada de muchas formas por las máquinas construidas por el hombre. Actualmente en el transporte se utilizan principalmente tres tipos de combustibles con diferentes procesos de combustión:

- **Gas natural.** Lo usan motores a gasolina que han sido modificados para trabajar con este combustible, principalmente por motivos económicos, sacrificando parte del rendimiento original que brindaba la gasolina, esto no quiere decir que su rendimiento como combustible sea deficiente, sino que estos motores fueron diseñados con relaciones de compresión que no brindan la misma eficiencia cuando se usa gas natural.
- **Gasolina).** Lo usan vehículos livianos principalmente.
- **Diesel (ACPM).** Es usado principalmente en el transporte pesado por su mayor densidad energética y el menor precio por galón respecto a la gasolina .

En el caso del ciclo Otto utilizado en motores a gasolina se da la combustión y el aprovechamiento del trabajo mecánico en cuatro tiempos, admisión, compresión, explosión o expansión y escape. En el tiempo de admisión es ingresada una mezcla de aire en combustible por la válvula de admisión mientras el pistón desciende desde el punto muerto superior hasta el punto muerto inferior, cuando ya ha ingresado la mezcla completamente al cilindro, la válvula de admisión se cierra e inicia la segunda fase de compresión, causada por la reducción de volumen mientras el pistón sube desde el punto muerto inferior hasta el punto muerto superior, cuando el sistema se encuentra a la máxima presión salta una chispa entre los electrodos de la bujía y de esta manera se inicia la propagación de la llama y la respectiva oxidación progresiva del combustible, cuando esto ocurre la liberación de energía obliga al pistón a bajar de nuevo transmitiendo la potencia a través de la biela hasta el cigüeñal, donde gracias a este se transforma el movimiento lineal en movimiento circular, es ésta la etapa en la cual el motor obtiene su potencia y se realiza de forma alternada entre los distintos cilindros para garantizar la energía suficiente que se necesita al realizar la compresión de la mezcla en el segundo momento del ciclo; finalmente inicia la etapa de escape donde se busca extraer los gases quemados para poder ingresar una mezcla aire- combustible nuevamente, para este fin la válvula de escape se abre estando el pistón en el punto muerto inferior e inicia su recorrido hasta el punto muerto superior evacuando el contenido del cilindro.

Una característica importante de los motores es la relación de compresión definida como la relación de volúmenes dentro del cilindro cuando el pistón se encuentra en el punto

muerto superior y en el punto muerto inferior, esto determinará la presión máxima a la que llegara la mezcla aire combustible al desde que salen de la chispa e inicien la quema progresiva. Para el caso de los motores a gasolina la relación de compresión ha aumentado los últimos años aumentando así su rendimiento pero también requieren combustibles de mejor calidad con octanajes más altos para evitar que la mezcla detone antes de tiempo y genere graves problemas mecánicos, actualmente los motores a gasolina de uso cotidiano modernos manejan relaciones de compresión alrededor de 10:1.

Para el motor diesel se manejan los mismos cuatro tiempos dentro del ciclo pero difiere del motor a gasolina principalmente por la forma en que se inicia la combustión que en el caso del motor diesel causada espontáneamente por la alta temperatura alcanzada dentro del cilindro. En el tiempo de admisión se ingresa solamente aire a través de la válvula de admisión mientras el pistón recorre desde el punto muerto superior a hasta el punto muerto inferior, allí se inicia el segundo tiempo que es la compresión cuando el pistón avanza desde el punto muerto inferior hasta el punto muerto superior aumentando considerablemente la presión y la temperatura dentro del cilindro, durante esta compresión no se genera ninguna combustión ya que se ingresó solamente aire, a partir de allí se inicia el tercer tiempo que es la combustión, un inyector que está conectado a la red de combustible a alta presión atomiza una pequeña cantidad de combustible dentro del cilindro causando su ignición de forma casi inmediata al entrar en contacto con el aire caliente, esta liberación energética obligada al pistón a descender desde el punto muerto superior hasta el punto muerto inferior aprovechándose la potencia generada, finalmente se deben evacuar los gases quemados dentro del cilindro y esto se realiza abriendo la válvula de escape mientras el pistón se encuentra en el punto muerto inferior e inicia su ascenso hasta el punto muerto superior evacuando la mayoría de estos gases y cerrando el ciclo.

Es de aclarar que la apertura y cierre del inyector está controlada por un módulo electrónico que determina el tiempo y nivel de apertura del mismo ingresando mayor o menor cantidad de combustible dentro del cilindro e influyendo directamente sobre el nivel de emisión contaminante generada por el motor ya que sí se ingresa demasiado combustible no será quemado completamente, emitiendo hidrocarburos debido a que no hay suficiente oxígeno para ser quemados, la central electrónica también tiene conectados sensores de temperatura y flujo del aire ingresado para determinar qué cantidad de combustible es la más adecuada inyectar al motor, en este sistema censa procesa y actúa constantemente para buscar el mejor rendimiento y el nivel más bajo de contaminación, en otras palabras una combustión completa. Los motores diesel modernos manejan relaciones de compresión alrededor de 18 a 1, factor determinante en la temperatura de trabajo del motor que por lo general es mucho más alta que la temperatura de trabajo del motor a gasolina.

2.3.1. Reacción estequiometrica de la combustión del Diesel

La combustión ideal entre un combustible y un comburente tiene que realizarse en unas proporciones adecuadas para aprovechar todo el rendimiento energético posible. La relación estequiometrica indica la proporción de combustible y comburente necesarios para lograr una combustión completa. En el caso de la gasolina la relación ideal debe ser de 14,7 gramos de aire por 1 gramo de gasolina. En los motores diesel la mezcla estequiométrica es bastante similar: 14,5 gramos de aire por 1 de diesel, [20]. La Figura 2-7 muestra la reacción química de la combustión de un hidrocarburo.

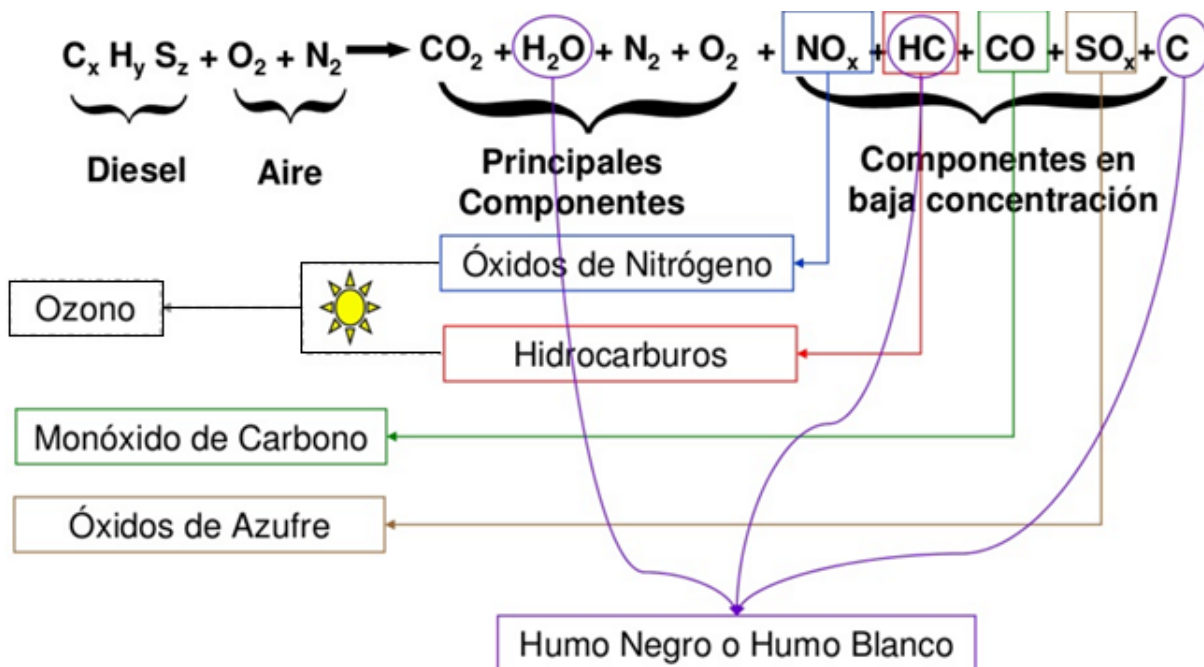


Figura 2-7: Reacción química de la combustión de un hidrocarburo. Tomado de: [20].

Con una relación aire/combustible más baja que la estequiométrica no todo el combustible podrá quemarse, pues no hay suficiente oxígeno para oxidar el combustible y una parte quedará sin quemar o parcialmente quemado, con formación de CO y HC, cabe aclarar que la combustión nunca es completa o ideal, independiente de la relación aire-combustible, puesto que la reacción nunca se desarrolla en condiciones controladas y existen muchos factores que pueden alterar ese débil equilibrio.

2.3.2. Tipos de combustion

Como la forma en que se desarrolla la combustión dentro de los motores no es siempre la misma y las condiciones externas son cambiantes, la combustión puede ser de dos formas,

completa e incompleta, refiriéndose a si todos los componentes de combustible fueron quemados o no, como ya lo nombré en el apartado anterior, casi nunca la combustión es completa y este hecho es el que genera buena parte de los problemas de contaminación que vivimos actualmente, a pesar de esto si tuviésemos una combustión completa tampoco dejarían de emitirse gases contaminantes la atmósfera, ya que el CO₂ a pesar de ser menos nocivo para nuestro cuerpo, causa efectos desastrosos sobre la atmósfera incrementando la velocidad del cambio climático a causa del efecto invernadero.

Una ventaja de los sistemas electrónicos de inyección frente a los mecánicos es la capacidad de readaptarse a las nuevas condiciones que se den por las variaciones de altitud o por otros motivos que puedan causar un mal funcionamiento del motor.

2.3.3. Factores que afectan la calidad de la combustión

Son muchos los factores que influyen e la calidad de la combustión para intentar llegar lo más cerca posible a la combustión completa, de estos los más relevantes son:

- Concentración de oxígeno.
- Temperatura ambiente.
- Presión atmosférica.
- Calidad del combustible.
- Correcto reglaje de los sistemas que suministran el combustible en la cámara de combustión.
- Carga que debe mover el motor.
- Revoluciones por minuto (rpm).
- Apertura y cierre en el momento adecuado de las válvulas de admisión y escape.

. Los tres primeros factores son determinados principalmente por la altitud en la que el motor se encuentre operando, este es uno de los motivos por los que el presente trabajo de investigación se fundamenta y tiene relevancia social, ambiental e ingenieril.

Es claro que los cambios de altitud tienen efectos en el funcionamiento del motor y en algunos casos afectan la calidad de la combustión, los modernos sistemas de inyección de combustible buscan optimizar el funcionamiento del motor cambiando la cantidad de combustible empleado y la forma de pulverizarlo dentro del cilindro, si la cantidad de oxígeno ingresada al cilindro disminuye la central electrónica disminuye también la

cantidad de combustible ingresado, manteniendo así el equilibrio estequiométrico o la mejor combinación para el funcionamiento adecuado del motor con unos niveles de emisión contaminante relativamente bajos.

2.3.4. Influencia de la Altitud sobre las emisiones

Nuestra topografía determinó la forma de trasladar los productos que no se producían en ciertos climas o regiones, desde tiempos de la conquista y debido a los asentamientos tan dispersos en nuestro territorio, con el agravante del aislamiento ocasionado por las cordilleras que cruzan a lo largo en sentido sur-norte y los cañones de los principales ríos que viajan en el mismo sentido como en Cauca y el Magdalena, las poblaciones se desarrollaron de manera distinta causando subdesarrollo y bajos niveles de producción. En la Figura 2-8 se observa como la red montañosa de suramérica se bifurca en nuestro territorio, creando más zonas aisladas.

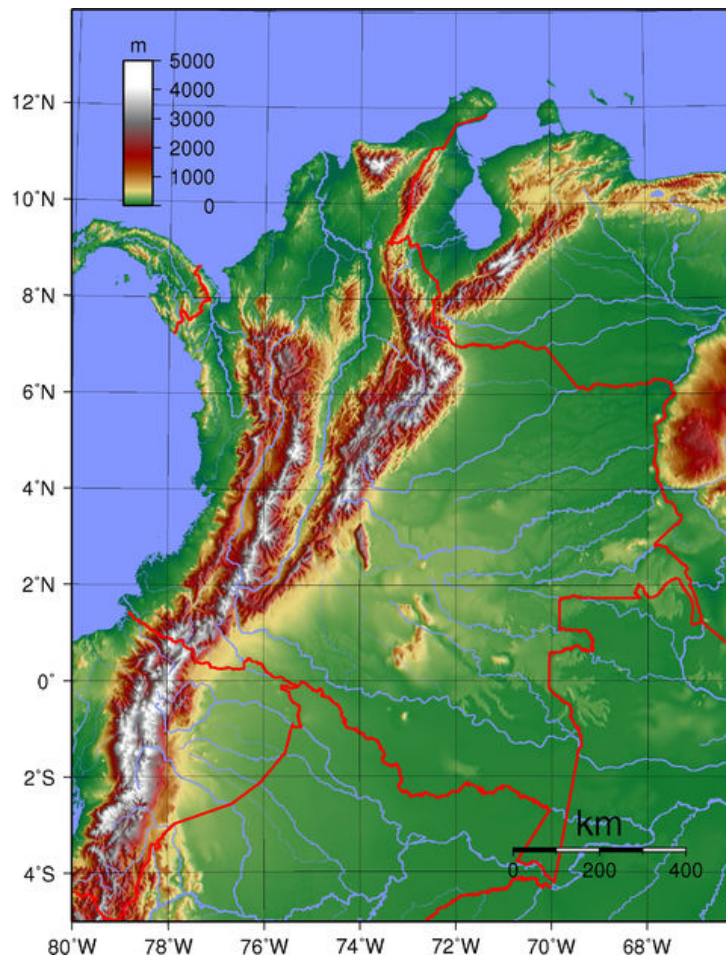


Figura 2-8: Red de cordilleras que finalizan en nuestro país. Tomado de:[23].

Las principales ciudades estaban dominando su propia subregión geográfica cercada por cordilleras y ciénagas con una poca industrialización lo que obligaba a importar la mayoría de productos terminados con las dificultades que esto conlleva para ser llevados desde las zonas costeras hasta el interior que se encuentra a más de 2500 m.s.n.m. Durante toda nuestra historia hemos permanecido aislados por los terrenos difíciles y las zonas de bosques densos, Colombia tiene en su territorio el 70 % de los páramos y esto influye sobre cualquier forma de transporte. Estas cordilleras definieron las zonas inundables de nuestro país y los cañones que luego formarían los principales ríos haciendo aún más difícil el transporte, lo que paralelamente incrementaba la contaminación, [12].

En la Figura 2-9 se muestra un modelo digital de la red montañosa para la fácil ubicación de las principales ciudades Colombianas, para el caso de Bogotá D.C su ubicación implica elevarse una considerable altitud desde la costa pacífica o atlántica, siendo este un factor determinante del tipo de transporte utilizado, la contaminación emitida y el nivel de competitividad que el país puede alcanzar ya que no es posible utilizar tecnologías más limpias y económicas respecto al consumo de combustible.

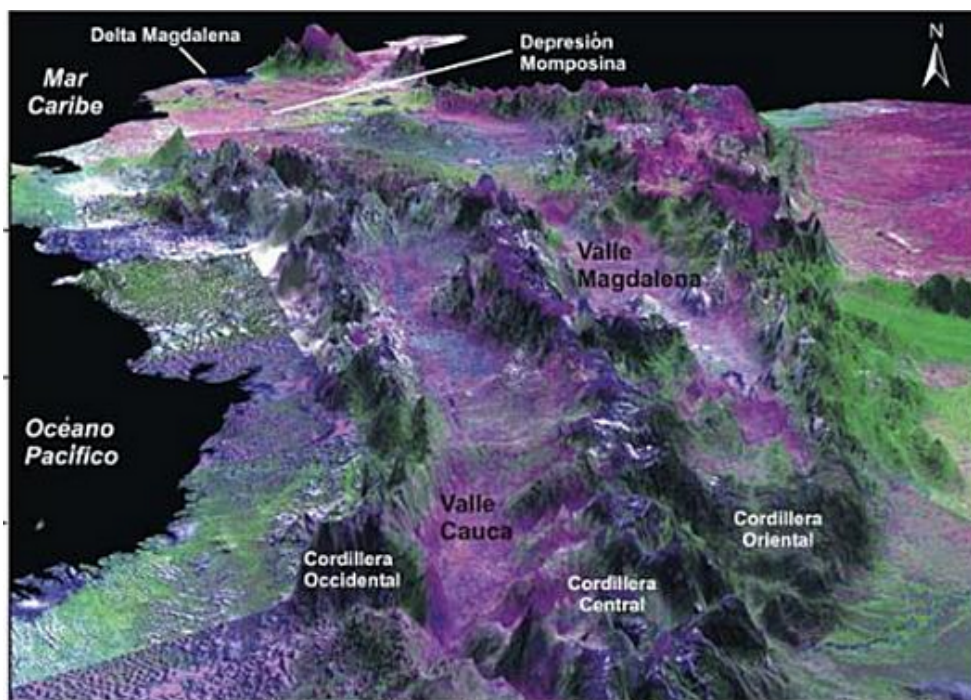


Figura 2-9: Modelo digital de las cordilleras Colombianas. Tomado de:[12].

Estos efectos causados por la naturaleza hicieron que en Colombia se distinguieran zonas con características geográficas distintas y al mismo tiempo afectó todo el andamiaje social y económico de las mismas, en el caso de Norte de Santander son muy pocas las vías

que se desarrollaron durante el siglo XX y en la actualidad se están iniciando planes que integran la región con el resto del país y la zona binacional. Ya se puede relacionar que una mejora en las condiciones en que se mueve el transporte, que disminuya el esfuerzo de los motores, también contribuye a disminuir los contaminantes emitidos, cambios como la pavimentación de vías nacionales, puentes y túneles, causaron una notoria diferencia.

Cuando se varia la altitud también cambian parámetros como la presión atmosférica, la concentración de oxígeno y la temperatura, factores que influyen directamente sobre la calidad de la combustión y los contaminantes emitidos, en zonas a nivel del mar la presión atmosférica es mayor, lo mismo sucede con la concentración de oxígeno, estas dos variables dependientes de la altitud determinan la calidad de la combustión y la generación o no de altos niveles de subproductos como el monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre e hidrocarburos.

La mayoría de la población mundial habita en zonas costeras pero en nuestro país sucede lo contrario ya que la primera ciudad en tamaño y la segunda se encuentran a 2600 metros sobre el nivel del mar y 1500 metros sobre el nivel del mar respectivamente, lo mismo sucede para la tercera ciudad que se encuentra a más de 2000 metros sobre el nivel del mar, siguiendo ese orden la cuarta ciudad sí se encuentra a nivel del mar pero buena parte de las restantes están ubicadas en las cordilleras o en los valles, esta situación empeora el panorama de la contaminación generada por fuentes móviles en nuestro país por la necesidad de movilizarnos entre estas ciudades, de esta manera nuestra topografía juega en contra de niveles menores de contaminación.

2.4. Gases tóxicos emitidos por los motores diesel

Normalmente hay mucha confusión entre el público respecto a cual motor contamina más, si el de gasolina o el diesel. Hemos escuchado afirmaciones en el sentido de que el motor diesel contamina menos que el motor a gasolina y que el humo que emite no es dañino.

Esto es una verdad a medias porque si estamos hablando de emisiones de monóxido de carbono (CO) y de hidrocarburos no quemados (HCx), el motor a gasolina es más contaminante; pero si hablamos de generación de humo (hollín o material particulado), el motor diesel es varias decenas más contaminante que el motor a gasolina.

Igualmente, el motor diesel genera más emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx) y de poliaromáticos.

Desde el punto de vista de afectación de la salud, es más peligroso el humo del motor

diesel que el del motor a gasolina debido a que la mayoría del material particulado que emite el motor diesel es respirable por su pequeño tamaño de la partícula (menos de 10 micras) por lo cual entra directamente a los pulmones sin que pueda ser retenido por las mucosas y demás mecanismos del sistema respiratorio.

Esta situación ha llevado a los productores de máquinas diesel a trabajar fuertemente para que su motor no pierda competitividad.

Están atacando la principal debilidad del diesel: las emisiones de material particulado. A la vez que han evolucionado en el diseño de la cámara de combustión y en los sistemas de inyección de combustible, también están imponiendo los sistemas utilizados para atrapar las partículas nocivas en el tubo de escape y los convertidores catalíticos.

2.5. Historia de las mediciones de emisiones

El estado de California en USA fue el pionero en medir las emisiones contaminantes de vehículos en el año de 1966, con esta información se planearon medidas que controlaran los niveles de contaminación, ya para 1968 todos los estados acogieron esta reglamentación. Estos controles sobre las emisiones las redujeron exitosamente en términos de cantidad por distancia recorrida. Sin embargo, las mayores distancias recorridas de los vehículos, igual que la gran cantidad de vehículos en circulación hacen que esa disminución sea cada vez menos notoria.

En las décadas siguientes la preocupación por las emisiones contaminantes de fuentes fijas y móviles sobrepasó las fronteras de los Estados Unidos y la zona Europea también se destacó en la búsqueda de tecnologías que aumentarían el rendimiento de los motores y al mismo tiempo sus desechos contaminantes disminuirían.

La regulación más destacada que inició en los años 90 del siglo pasado son las normas Euro con seis versiones que van desde el año 1992 hasta 2014, reduciendo cada vez más los niveles de emisiones contaminantes permitidos esta reglamentación junto con protocolos ambientales, el de Kyoto han unido al mundo en torno al mejoramiento de la calidad de vida para los habitantes que cada día aumentan exponencialmente.

En Colombia es de reciente la normativa sobre emisiones contaminantes, éste no era un tema prioritario en la agenda de los gobiernos debido a la poca aceptación que siempre ha tenido la población a estas restricciones en, en nuestro país se iniciaron análisis de gases en vehículos a gasolina, parámetro a parámetro pero en el caso de los motores Diesel no se han medido de la misma manera ya que se requieren equipos diferentes para cuantificar correctamente estas emisiones, actualmente sólo se evalúa la opacidad de los humos ge-

nerados por motores Diesel mientras que para los motores de gasolina sí se miden varios parámetros simultáneamente.

Colombia no tenía una política clara frente a la contaminación de fuentes móviles, ni siquiera ha medido bajo sus condiciones topográficas, ambientales y sociales las emisiones de los motores, mucho menos una norma propia para darle límites a cada parámetro, por este motivo en el año 2013 surge del decreto 1111 donde se acogía a las normas internacionales Euro en su cuarta versión, específicamente para los motores diesel y se determinaba que a partir del año 2015 los motores diesel que se comercializarán en nuestro país debían cumplir esta normativa, Colombia fue de los últimos países que actualizó su normativa ambiental a este nivel donde otros como Chile y Argentina ya lo habían realizado en años anteriores.

2.5.1. Tipos de emisiones en fuentes móviles

Las emisiones de un vehículo se clasifican en tres categorías, [21]:

2.5.1.1. Emisiones del exhosto

Son los gases utilizados por el ciclo del motor de combustión interna, los principales son:

- **Óxido de nitrógeno (NO_x)**. Son causados por la reacción del oxígeno con el nitrógeno y condiciones de alta temperatura y presión que se presentan dentro del motor, las emisiones de estos óxidos de nitrógeno contribuyen a la creación de smog, así como a la formación lluvia ácida, los motores diesel generan más óxidos de nitrógeno debido a las mayores temperaturas que presentan en sus cámaras.
- **Hidrocarburos**. Son partículas que no se quemaron en la combustión o lo hicieron parcialmente, y es el principal generador del smog en el aire, reconocido como altamente tóxico para la salud, causan daños en el hígado, así como cáncer si se está continuamente expuesto a este elemento.
- **Dióxido de carbono (CO_2)**. Este es el gas que se espera cuando se da una combustión perfecta, pero eso no quiere decir que sea benéfico para la salud en altas dosis, también es el principal causante del efecto invernadero que tanto afecta a nuestro planeta.
- **Monóxido de carbono (CO)**. Se presenta cuando la combustión es incompleta, ya sea por factores mecánicos del motor o por factores externos a él, causa problemas cardíacos porque compromete la capacidad de transporte de oxígeno en la sangre.

- **Material Particulado (PM).** En los motores diesel, por las características del combustible se emiten estas partículas que afectan la salud, son tan pequeñas que pueden ingresar fácilmente a los pulmones e incluso romper vasos sanguíneos en los alvéolos pulmonares.

2.5.1.2. Emisiones evaporadas

Son producidas por los cambios de presión y temperatura de algunos fluidos de los motores, de estas la más importante es la evaporación de combustible dentro del tanque de almacenamiento, dada mayormente en la gasolina por ser más volátil. Otros fluidos como los aceites también emiten al ambiente gases nocivos además de ser altamente contaminantes para las fuentes hídricas y el suelo en sí.

2.5.1.3. Pérdidas y fugas

Se trata del escape de los vapores de la gasolina y aceite cuando el motor está caliente.

2.5.2. Elementos mecánicos para control de emisiones

Como los acuerdos entre gobiernos y fabricantes de vehículos para disminuir las emisiones contaminantes no dieron el fruto que se esperaba, las restricciones como las normas Euro en la zona europea y las EPA en los Estados Unidos, así como los países que adoptaban una u otra norma, que obligaron a los fabricantes a disminuir la contaminación so pena de no poder comercializar sus vehículos en los países en que tuvieran vigencia las normas, para resolver esto los departamentos de diseño mecánico instalaron en los vehículos sistemas que sin comprometer considerablemente el rendimiento del motor disminuían las emisiones a los niveles permitidos.[8]

2.5.2.1. Catalizadores

Nace en los años 80, mediante una reacción química dentro del alojamiento se eliminan buena parte de las emisiones dañinas. Actualmente este sistema es utilizado por la marca Chevrolet en nuestro país en modelos LV152 y LV452 que comparten la misma motorización y en su actualización para motores diesel es llamado catalizador oxidativo para vehículos diesel (DOC)

En la Figura 2-10 se observan las partes de un catalizador común.

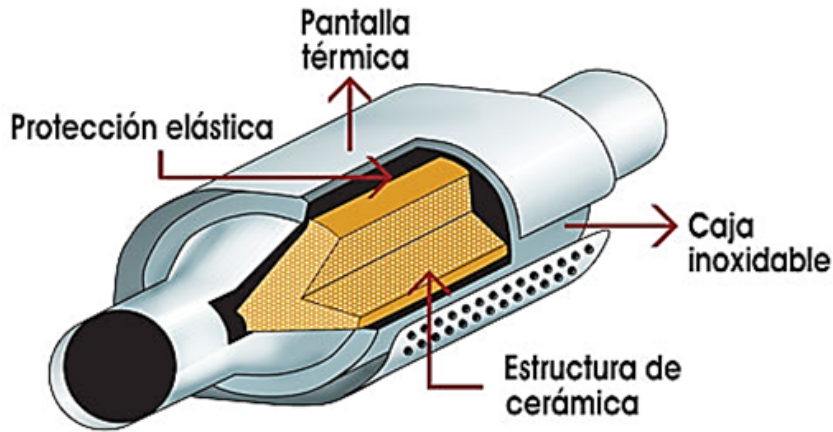


Figura 2-10: Catalizador. Tomado de: [24]

2.5.2.2. Sistema EGR

Debido a que en los arranques fríos la combustión no es completa porque la temperatura de trabajo no se ha alcanzado, no se realiza la quema completa de combustible para la que se diseñó y en el tubo de escape se presentan gases nocivos, un método que soluciona este problema es recircular un 10% de los gases mal quemados introduciéndolos de nuevo a la admisión, ese método disminuye la potencia del motor, pero contribuye positivamente a un aire más limpio. En Colombia este sistema es ampliamente utilizado en motores diesel, desde vehículos livianos, hasta los buses que analizó este proyecto investigativo.

La válvula EGR se observa en la Figura 2-11.

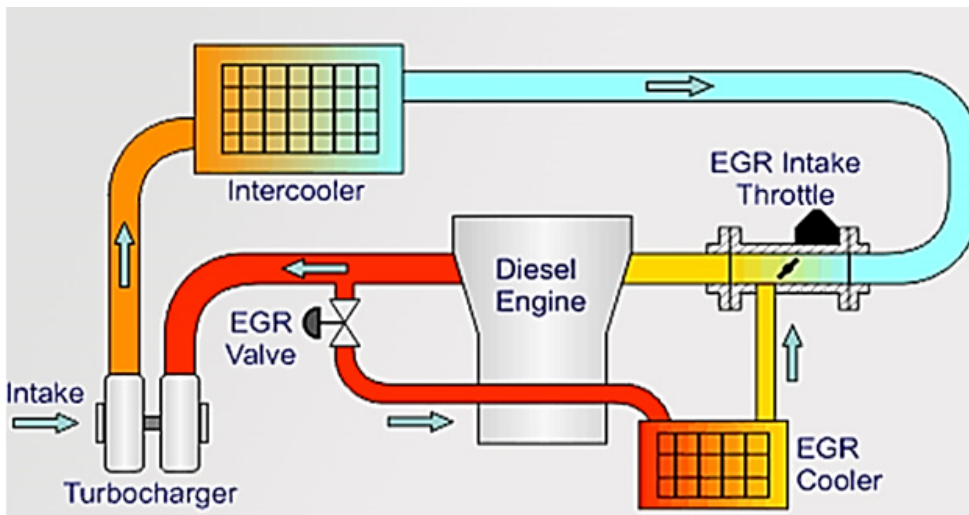


Figura 2-11: Sistema EGR. Tomado de:[24]

2.5.2.3. Sistema Ad Blue SCR

Cuando las normas se volvieron más restrictivas los catalizadores no eran suficientes y se hizo necesario implementar otro tratador químico, este sistema utiliza una mezcla de urea diluida al 32 % que al ser mezclada con los gases transforma éstos en hidrógeno y agua. En nuestro país este sistema es utilizado actualmente por la marca Scania en sus modelos K360 y K410. En la Figura 2-12 se observa el sistema AdBlue.

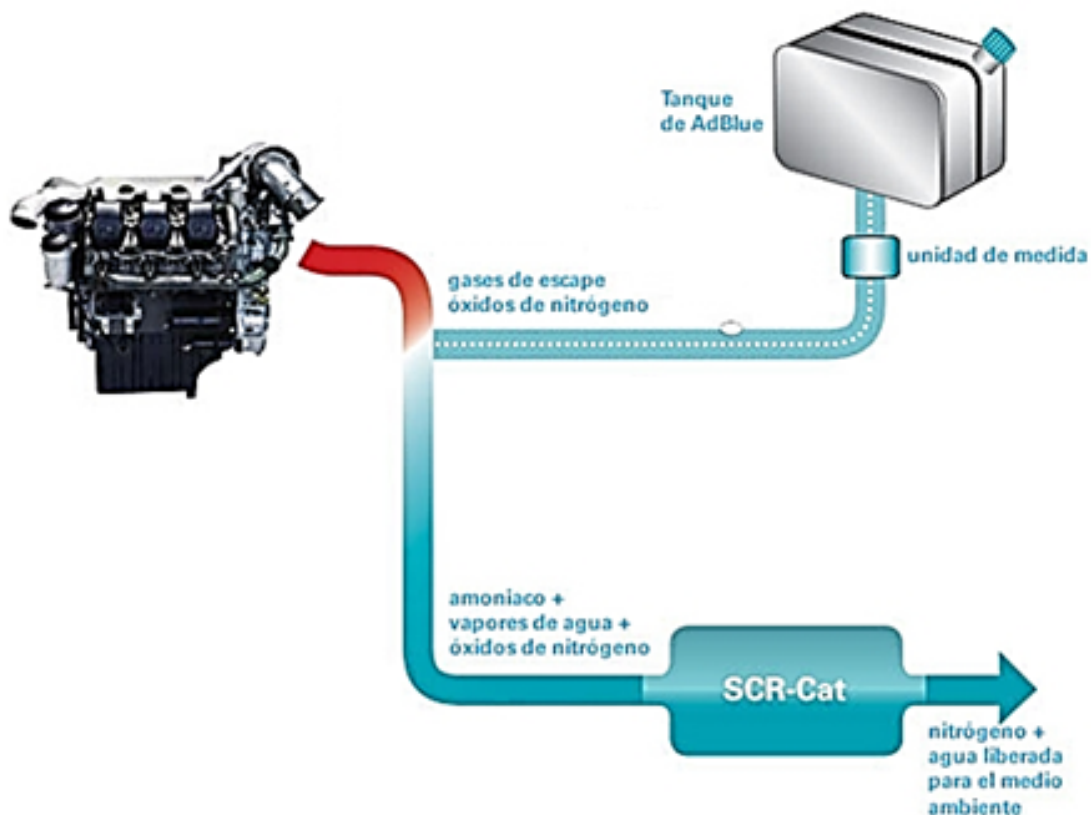


Figura 2-12: Sistema Ad Blue. Tomado de:

En la Figura 2-13 se aprecia como se inyecta la urea diluida en el sistema de escape, ya que este aditivo no es un combustible, nunca ingresa al motor, sino que se mezcla posteriormente con los gases.

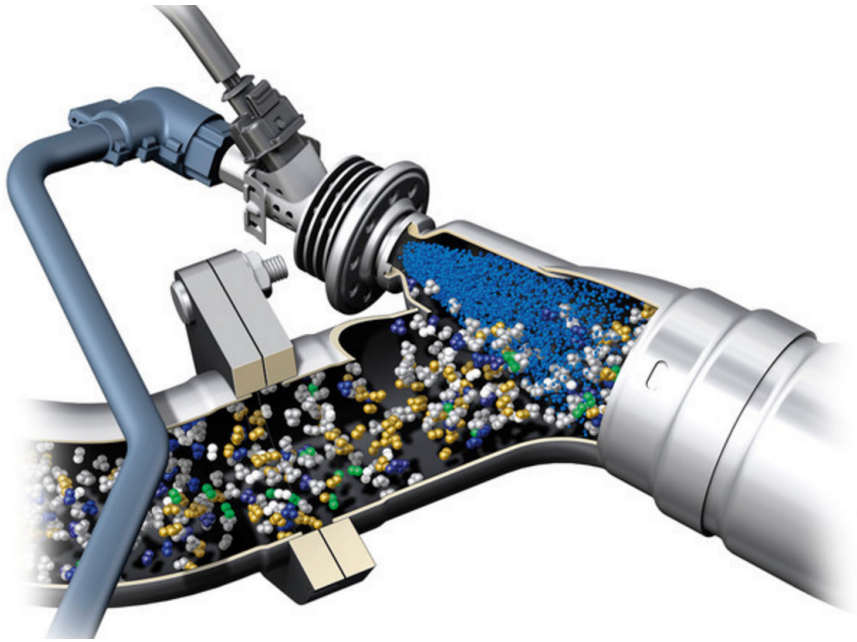


Figura 2-13: Inyección de urea diluida en el sistema de escape . Tomado de[8]:

2.6. Normas Euro

Las denominadas normas Euro fijan los valores límite de las emisiones contaminantes de los vehículos nuevos. En la actualidad, para un vehículo las emisiones de gases contaminantes tienen un papel muy importante porque el tipo impositivo depende también de la clasificación que establecen las diferentes normas Euro.

El código indicado en el permiso de circulación ofrece información sobre el nivel de emisión de contaminantes del vehículo.

Las disposiciones legislativas son cada vez más exigentes, el Parlamento Europeo ha decidido fijar nuevos valores límite para la emisión de contaminantes. Euro 5 entró en vigor el 1 de septiembre de 2009. Al mismo tiempo, la eurozona ha fijado ya los valores de la norma Euro 6 (a partir de 2014) para la industria del automóvil, [25].

En la Tabla 2-1 se aprecian los valores para cada una de las versiones de la norma euro para motores diesel.

Esta normativa también es acogida por otros estados que no poseen un sistema sólido para cuantificar, analizar y restringir las emisiones contaminantes, este es el caso de Colombia que por medio de la resolución 1111 de 2013 asumió los niveles máximos impuestos por la

Limitaciones a las emisiones para vehículos nuevos con motor Diesel						
	Válido a partir de	CO (g/km)	HC (g/km)	NO _x (g/km)	HC + NO _x (g/km)	PM
Euro I	01/01/1992	3,16	-	-	1,13	0,14
Euro II	01/01/1996	1	0,15	0,55	0,7	0,08
Euro III	01/01/2000	0,64	0,06	0,5	0,56	0,05
Euro IV	01/01/2005	0,5	0,05	0,25	0,3	-
Euro V	01/09/2009	0,5	0,005	0,18	0,23	0,005
Euro VI	01/08/2014	0,5	0,09	0,08	0,17	0,005

Tabla 2-1: Normativa Euro para motores diesel

norma Euro en su cuarta versión, para los motores diesel que se comercialicen en nuestro país a partir de 2015.

2.6.1. Métodos de medición de las emisiones del exosto

2.6.1.1. Prueba dinámica

En esta prueba se dan resultados en gramos emitidos por kilómetro recorrido (g/km) ó gramos por kilowatt de potencia entregada por el motor (g/KW), lo que restringe las formas de medirla ya que se necesita de equipos más robustos.

2.6.1.2. Prueba en ralentí

Se trata de la medición directa en marcha mínima de los motores con algunos ciclos de aceleración pero siempre manteniendo el vehículo detenido (ICONTEC, NORMA TÉCNICA NTC 4231, 2002), es más conveniente para mediciones comparativas entre motores a gasolina y diesel ya que se manejan las mismas unidades, ppm ó %.

2.6.2. ¿Que se mide en Colombia?

En Colombia para las revisiones tecno mecánicas que se realizan a los vehículos en circulación, específicamente en el apartado de análisis de gases se pueden diferenciar dos grupos, el análisis realizado a vehículos con motor a gasolina ciclo Otto y los realizados a vehículos con motor diesel.

En la Tabla **2-2** vemos las variables medidas en Colombia para dos tipos de combustible, gasolina y diesel.

TIPO DE COMBUSTIBLE	VARIABLES A MEDIR
GASOLINA	Temperatura
	RPM
	Monóxido de Carbono (CO)
	Dióxido de carbono (CO ₂)
	Oxígeno (O ₂)
	Óxido de nitrógeno (NO)
	Hidrocarburos
DIESEL	Temperatura
	RPM
	Opacidad

Tabla 2-2: Parámetros contaminantes medidos en Colombia

En la tabla se observan claramente los parámetros que se miden para un vehículo con motor a gasolina, estos parámetros dan una idea clara de cómo está quemando el vehículo y qué tanto está contaminando, allí se mide temperaturas de funcionamiento, r.p.m., monóxido de carbono, dióxido de carbono, oxígeno, óxido de nitrógeno, hidrocarburos no quemados.

Estos parámetros son medidos en porcentaje a excepción de la temperatura que se miden en grados centígrados y las revoluciones del motor que se miden en ciclos por minuto.

Contrario las mediciones en los motores a gasolina, para los motores diesel se lleva a cabo la medición de menos parámetros siendo estos temperatura de funcionamiento, r.p.m., opacidad; dejando solamente en este último valor la percepción de que tanto está contaminando el motor diesel, sin medir cada una de las variables que componen la contaminación generada, la opacidad se define como la cantidad de luz que no puede atravesar una columna de humo es decir que mientras más negro sea éste un menos luz será capaz de atravesar la misma columna emitida este método parte de que mientras más denso sea el humo emitido más contaminante será dando lugar a ambigüedades que no permiten juzgar adecuadamente, este vacío normativo no promueve un desarrollo adecuado de políticas ambientales ya que sin una cuantificación clara y específica es imposible determinar las variables independientes que incrementan las emisiones contaminantes.

Según la resolución 910 de 2008 para los parámetros anteriormente expuestos según el tipo de vehículo se determinaron los valores máximos permitidos.

En la Tabla **2-3** se presentan los valores máximos de monóxido de carbono (CO) en porcentaje y los valores máximos de hidrocarburos en partes por millón para vehículos

AÑO MODELO (Gasolina)	CO (%)	HC (ppm)
1970 y anterior	5,0	800
1971 - 1984	4,0	650
1985 - 1997	3,0	400
1998 y posterior	1,0	200

Tabla 2-3: Valores máximos de monóxido de carbono (CO) e hidrocarburos, para vehículos con motores a gasolina en Colombia

Tomado de:[3].

con motores a gasolina según el modelo registrado.

En la Tabla 2-4 se muestran los valores máximos permitidos para vehículos movidos con motores al gas natural vehicular ya sean originales o convertidos a este combustible, debido a que la mayoría de vehículos que utilizan gas natural vehicular son acondicionados a partir del motor a gasolina, los valores máximos permitidos de monóxido de carbono (CO) e hidrocarburos son los mismos que para los motores a gasolina, manteniendo la misma distinción en cuatro categorías según el modelo.

AÑO MODELO (GLP)	CO (%)	HC (ppm)
1970 y anterior	5,0	800
1971 - 1984	4,0	650
1985 - 1997	3,0	400
1998 y posterior	1,0	200

Tabla 2-4: Valores máximos de monóxido de carbono (CO) e hidrocarburos, para vehículos con motores movidos con GLP en Colombia. Tomado de:[3].

Para las motocicletas de cuatro tiempos no existe en distinción según el modelo y se evidencia los valores máximos permitidos bastante altos respecto a los valores dados para los vehículos, estos explica por la baja tecnología en cuanto a dosificación de combustible que tienen la mayoría de estos vehículos ya que en funciona en gran parte con sistemas de carburación simples, eso la sitúa como uno de los medios de transporte más contaminantes por pasajero transportado, ver Tabla 2-5. En la Tabla 2-7 se observan los valores máximos de opacidad para vehículos con motor diesel en Colombia, se hace distinción según el modelo en cuatro categorías, 1970 y anterior, 1971 a 1984, 1985 a 1997 y finalmente de 1998 y posteriores, con un Valor máximo de opacidad en el caso del modelo más antiguo de 50 % y para los modelos más recientes del 35 %.

AÑO MODELO (MOTOS)	CO (%)	HC (ppm)
Todos	4,5	2000

Tabla 2-5: Valores máximos de monóxido de carbono (CO) e hidrocarburos, para motocicletas cuatro tiempos en Colombia. Tomado de:[3]

Tabla 2-6: Add caption

AÑO MODELO (DIESEL)	OPACIDAD (%)
1970 y anterior	50
1971 - 1984	45
1985 - 1997	40
1998 y posterior	35

Tabla 2-7: Valores máximos de opacidad para vehículos con motor Diesel en Colombia. Tomado de:[3].

2.7. LEYES Y NORMAS COLOMBIANAS

El decreto 910 de 2008 reglamenta los niveles máximos de contaminantes en nuestro país y utiliza las mismas unidades de las normas Euro de la eurozona y EPA de los Estados Unidos, [3].

Por otro lado la norma técnica Colombiana NTC 5375,[18] , determina los aspectos a tener en cuenta cuando se realiza la revisión técnico-mecánica en Colombia, y la norma NTC 4231 ofrece un método para medir la opacidad en motores Diesel.

2.7.1. Medida de la contaminación en ralentí

Otra preocupación que se tiene en el mundo es la contaminación en ralentí, [14] [29] [31], y en este aspecto podemos comparar con las medidas que se toman en Colombia a motores de gasolina ya que concuerdan las unidades utilizadas partes por millón (ppm) o porcentaje%. En la Figura 2-14 se muestra una comparación entre las emisiones de motores diesel y gasolina, medidos en ralentí.

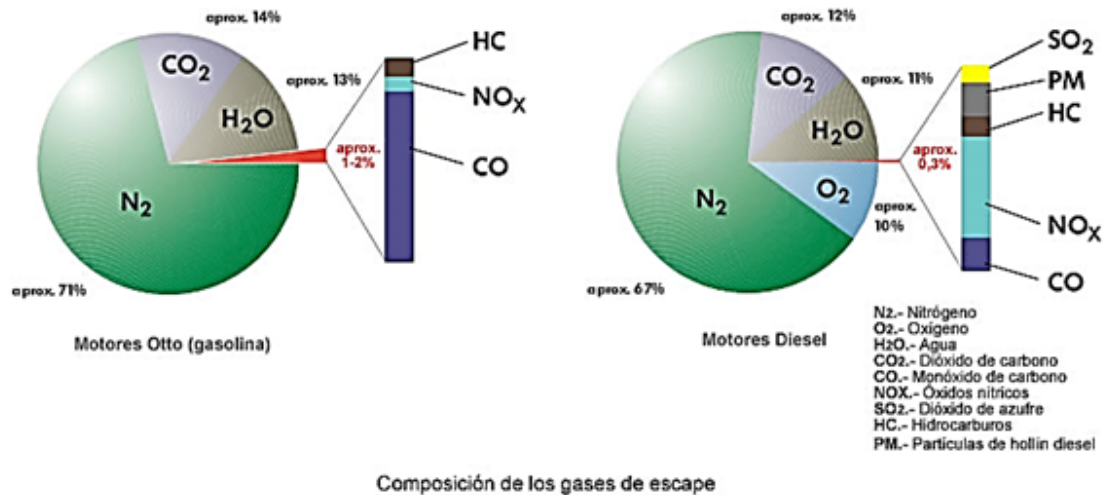


Figura 2-14: Contaminación en ralentí. Tomado de:[14]

2.8. Efectos dañinos de las emisiones sobre la salud

No hay duda sobre los daños que se producen sobre el cuerpo humano a raíz de las emisiones contaminantes generadas por vehículos con motor diesel, dentro de los efectos principales se tienen los siguientes,[16] [14] [29] :

- Mayor riesgo de cáncer.
- Mayor porcentaje de asma.
- Mayor riesgo de infecciones bronquiales (pulmón) y de problemas pulmonares.
- Problemas cardíacos y cardiovasculares.
- Alergias en la piel, nariz y garganta.
- Problemas respiratorios.
- Menor productividad, pérdida de jornadas escolares y días de trabajo, aumento de las consultas hospitalarias.
- Fatiga, náuseas, ardor en el estómago, dolores de cabeza.
- Bronquitis crónica.
- Bronquitis crónica.

2.9. ANTECEDENTES

En 1966 inicia la medición formal de emisiones contaminantes a vehículos en el estado de California. Para 2008 Pedro Benjumea, John Agudelo y Andrés Agudelo en el estudio titulado: EFFECT OF ALTITUDE AND PALM OIL BIODIESEL FUELLING ON THE PERFORMANCE AND COMBUSTION CHARACTERISTICS OF A HSDI DIESEL ENGINE en el que se prueba y analiza el efecto de la altitud sobre el rendimiento del motor diesel. “Las pruebas se realizaron en condiciones de funcionamiento de estado estacionario, en dos alturas sobre el nivel del mar: 500 y 2400 m. El abastecimiento de combustible biodiesel y la altitud tuvieron un efecto aditivo sobre el avance de la inyección y los tiempos de combustión, la duración de la etapa de combustión premezclada aumenta con la altitud”. Esto prueba que es pertinente estudiar los efectos que tienen los cambios atmosféricos debidos a la altitud, ya que nuestro país presenta diferencias considerables que afectan su rendimiento e indiscutiblemente sus emisiones contaminantes, [19].

En el 2014 Alfonso Quijano e Iván Meléndez docentes e investigadores de la Universidad de Pamplona presentaron el estudio titulado: IDENTIFICACIÓN DE HIDROCARBUROS AROMÁTICOS POLICÍCLICOS (HAPS) EN EL PM_{2.5} DEL AIRE DE PAMPLONA-COLOMBIA donde se hace una descripción de los elementos contaminantes presentes en el aire de la ciudad de Pamplona- Colombia, evidenciando que el transporte que utiliza motores diesel afecta considerablemente la calidad de vida de las comunidades aledañas. De este estudio es importante destacar que se realizaron mediciones en condiciones reales lo que da herramientas para la toma de decisiones y nuevas investigaciones, [27].

Analizando más estudios realizados en motores diesel donde se establecieran las variables que influyen en su rendimiento se encontró el artículo titulado: EFFECTS OF ALTITUDE AND FUEL OXYGEN CONTENT ON THE PERFORMANCE OF A HIGH PRESSURE COMMON RAIL DIESEL ENGIN, presentado por Shaohua Liu, Lizhong Shen, Yuhua Bi y Jilin Lei del laboratorio de motores perteneciente a la universidad de Kunming, China. Allí ya se establece una condición más específica en los motores diesel y que es acorde a su evolución, el riel común, ya con este elemento que homogeniza la presión del combustible antes de ingresar a los inyectores, se realizaron pruebas para determinar si la altitud jugaba un papel importante en su desempeño, y cuando se habla de desempeño no se puede dejar atrás sus niveles de contaminación, [22].

El artículo titulado: EFFECTS OF ALTITUDE ON THE THERMAL EFFICIENCY OF A HEAVY-DUTY DIESEL ENGINE que se presentó en el año 2013 por Xin Wang, Yunshan Ge, Linxiao Yu y Xiangyu Feng pertenecientes al laboratorio de potencia en motores del departamento de Ingeniería Mecánica del instituto de tecnología de Beijing, China,

establece los efectos que sobre la eficiencia térmica de motores diesel tienen los cambios de altitud, demostrando que a pesar de elementos como el turbo que intenta mantener la presión constante en la admisión del motor, su rendimiento se ve afectado por estos cambios, [37]

En el año 2012 se presenta la tesis doctoral en la Universidad Politécnica de Madrid titulada: ASPECTOS DE LA MEDICIÓN DINÁMICA INSTANTANEA DE EMISIONES DE MOTORES. APLICACIÓN AL DESARROLLO DE UN EQUIPO PORTÁTIL Y UNA METODOLOGÍA PARA ESTUDIOS DE CONTAMINACIÓN DE VEHÍCULOS EN TRÁFICO REAL por Natalia Elizabeth Fonseca González, Ingeniera Mecánica que ha trabajado en aspectos relacionados con la medición de contaminantes en tiempo real y el desarrollo de equipos portátiles que permitan medir con mayor precisión las emisiones, en fuentes móviles,[13].

Existen otros estudios que han determinado la contaminación total en una ciudad o departamento, pero basándose en datos estadísticos y registros teóricos sobre las emisiones de automóviles; sin realizar mediciones en el sitio de estudio, lo que puede llevar a errores por acumulación e incertidumbre.

En el año 2013 se presenta el trabajo de grado para optar al título de: MAESTRÍA EN DESARROLLO SOSTENIBLE Y MEDIO AMBIENTE por Oscar Chamarravi Guerra y Germán Saavedra Calixto, titulado: EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL GENERADO POR LA EMISIÓN DE GASES EN MOTORES QUE UTILIZAN COMPONENTOS LUBRICANTES, EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ D.C. donde se contemplan aspectos nuevos en el análisis de gases, como son la utilización de aditivos antifricción que sumado al hecho de realizar el análisis de motores en el contexto nacional proveen información nueva de cómo se comportan los motores cuando no fueron diseñados para condiciones topográficas como las que presenta Colombia, [15].

Con estos antecedentes sobre contaminación y rendimiento de motores diesel en condiciones variables de altitud se puede ver que hay una preocupación sobre cómo, cuándo y que medir en los motores para conservar un rendimiento óptimo y no sobrepasar los valores de contaminantes permitidos, es una motivación a continuar investigando sobre estos temas y no esperar a que nuestras condiciones estén deterioradas para empezar a buscar formas de controlar y disminuir las emisiones contaminantes que ya nos están afectando, como se ve en la Figura

Capítulo 3

MARCO METODOLÓGICO

Para la cuantificación de las emisiones contaminantes generadas en ralentí por el transporte pesado de pasajeros a diferentes altitudes, se procedió con la recopilación de la bibliografía científica y los antecedentes respectivos sobre el tema. Seguidamente se realiza el modelo de diseño experimental para la recolección de datos. Se preparan los equipos necesarios y se lleva a cabo la recolección de datos en las tres altitudes determinadas y representativas para que finalmente se pueda estudiar y analizar las diferencias de emisiones generadas por la variación de altitud, luego con estos datos se hace una diferenciación entre las emisiones de vehículos con motor a gasolina y otros con motor diesel .

3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN

El tipo de investigación que se llevo a cabo en este proyecto fue del tipo descriptivo - experimental ya que busca evidenciar una situación que actualmente ocurre y también contrasta datos reales medidos contra lo estimado por diferentes teorías, de esta manera se puede estimar de manera más precisa futuros valores que afecten los niveles establecidos. A nivel mundial no existe acuerdo sobre el grado de contaminación generado por los motores en diferentes condiciones, lo que ha llevado a la implementación de múltiples formas de cuantificar las emisiones, esto supone un inconveniente ya que no es fácil de comparar mediciones de varios métodos, pero a la vez es una oportunidad para determinar que métodos son más adecuados en un territorio específicamente.

3.2. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

En nuestro país el transporte pesado se ha estigmatizado como una de las principales fuentes de contaminación ambiental ya que sus emisiones visibles son mucho mayores que

las de motores a gasolina, la forma de ser refinado de combustible diesel y la manera en que es quemado dentro del motor determina en gran medida como será combinado con el oxígeno y que calidad tendrá esta combustión.

En Colombia se inició la masificación del uso de combustible diesel sin estudios previos que estimaran a futuro los efectos de este tipo de políticas, teniendo únicamente en cuenta los beneficios económicos del sector cuando la gasolina empezaba a escasear y la reserva de crudo en nuestro país no aumentaban considerablemente. En ese entonces, se determinó que una salida a este problema era incentivar el uso de un combustible más económico, fácil de refinar y en últimas más abundante, claro que no todo eran ventajas, ya que los motores que utilizan este tipo de combustible son más costosos y sus reparaciones son más complejas aunque en teoría recorrerían más kilómetros antes de necesitar una intervención costosa.

En los años 90 todo era permitido en el sector transporte, era posible cambiar el tipo de utilización de un vehículo de un servicio con itinerario fijo y rutas establecidas por el ministerio de transporte a un servicio cuasi particular donde se acordaban los viajes y se acordaban rutas según la necesidad del usuario este servicio llamado especial o turismo en era permitido con vehículos antiguos que a pesar de que ya habían cumplido su ciclo de vida dentro de las empresas no se procedía con su chatarrización sino que por medio de trucos mal elaborados, adaptación de motores, transmisiones y sistemas de frenos que no fueron diseñados para esa carrocería, se alargaba su tiempo de utilización hasta por 20 años más sin importar la calidad del servicio, la cantidad de emisiones al medio ambiente o el bajo nivel de seguridad que estos injertos podían brindar. Esta situación también influiría negativamente sobre nuestros desarrollos ingenieriles pues al seguir manteniendo forzosamente tecnología obsoleta en un mercado que por las condiciones ambientales, sociales y topográficas requiere de evolución constante, nadie se veía incentivado a buscar soluciones eficientes y por el contrario los volvíamos más dependientes de tecnologías extranjeras.

Ya en el siglo XXI se adoptaron medidas para actualizar a Colombia en normas reglamentarias de emisiones contaminantes, siguiendo la tendencia de países como Brasil, Argentina y Chile; como no existía una cuantificación real de los niveles de contaminación emitida por fuentes móviles se determinó que lo más conveniente era seguir la tendencia, de esta manera a partir del año 2015 todos los motores diesel deberían cumplir con la normativa Euro IV a pesar de que nuestro país no existía la tecnología adecuada para corroborar este cumplimiento, se dejó en manos de los fabricantes que deseaban ingresar al mercado Colombiano la realización de estas pruebas en el exterior y con ello permitirles su comercialización, con estas medidas el problema estaba aparentemente solucionado pero todavía era necesario tener una percepción clara que las emisiones contaminantes emitidas

por motores funcionando en nuestras condiciones.

Por este motivo este proyecto buscaba cuantificar las emisiones generadas por motores diesel en condiciones de funcionamiento reales como paso inicial para la toma de decisiones en políticas públicas ambientales y el diseño de nueva tecnología en nuestro país que permitan aumentar la eficiencia energética pero al mismo tiempo disminuir los niveles de contaminación causados por fuentes móviles que utilizan motores diesel, al mismo tiempo se quería comparar las emisiones de motores diesel en ralentí y de motores a gasolina bajo esta misma condición, independientemente de los modelos o cilindrajes ya que es casi imposible encontrar vehículos con motores a gasolina de 15000 centímetros cúbicos, esta comparación es válida pues en los dos motores se da una combustión que coincide en ciertos gases contaminantes como monóxido de carbono (CO) y óxidos de nitrógeno (NOx) que independientemente de la fuente están matando seres humanos y afectando seriamente nuestro ambiente, independientemente del valor que puedan presentar y como se busca contrastar el mismo parámetro bajo la misma condición de ralentí la comparación se hace válida, a partir de allí se pueden realizar inferencias respecto a la cantidad de contaminación por pasajero transportado o valor de uso que se le pueda dar al vehículo y estos análisis son los que permiten tomar las decisiones adecuadas para el mejoramiento de la calidad de vida de la sociedad.

Un ejemplo de estas paradojas, es la contaminación de una motocicleta comparada con un vehículo liviano con motor a gasolina, a pesar de que el cilindraje de la motocicleta sea menor, sus niveles de contaminación pueden ser iguales o cercanos que los del vehículo particular, lo que evidencian los niveles máximos permitidos para motocicletas de cuatro tiempos y vehículos con motor a gasolina mostrados en las Tablas **2-3** y **2-5** respectivamente, además el vehículo puede transportar hasta cinco pasajeros mientras que la motocicleta solamente transportará dos, este análisis es claro para las autoridades ambientales mundiales y por este motivo se han determinado políticas y normas más estrictas que buscan disminuir el atractivo hacia los vehículos de dos ruedas por parte de los consumidores.

Esta investigación midió vehículos con motores diesel de transporte pesado de pasajeros que cumplieran normativa vigente en nuestro país en el momento de diseñar la investigación, que para el caso es Euro IV, pero por los motivos técnicos respecto a equipos requeridos para la toma de estas mediciones fue necesario realizar mediciones en ralentí, ya que las normas Euro IV limitan los niveles de contaminación en unidades de gramos de contaminante emitido por cada kilómetro recorrido (g/km), ó gramos de contaminante emitido por cada kilovatio-hora (g/kWh) para los camiones y autobuses y en nuestro país aún no se realizan estas pruebas comercialmente. Las mediciones se realizaron en ralentí y siguiendo el procedimiento compatible con la medición que actualmente se realiza a

motores diesel en Colombia. Estos vehículos se caracterizan por tener pesos brutos vehiculares alrededor de 17 toneladas y cilindrajes entre 12000 y 15000 centímetros cúbicos, con una capacidad de transporte desde 34 hasta 42 pasajeros según el tipo de carrocería y elementos de comfort instalados.

3.3. POBLACIÓN

Para darle relevancia al proyecto y vigencia futura la población inicial eran todos los buses que cumplieran la normativa Euro IV, según lo estipulado en el decreto 1111 de 2013, donde se disponía que todos los vehículos con motor diesel que ingresen al país para transporte de carga o pasajeros no deberían exceder los límites que estipula la norma Euro en su cuarta versión, lo que hacía difícil saber o tener una cifra clara de cuantos vehículos tipo bus con peso bruto vehicular aproximado de diecisiete toneladas estaban en circulación, así que se empezó a indagar en las principales empresas de transporte de pasajeros para determinar una cifra aproximada. De estas empresas quien respondió a la solicitud fue Berlinas del Fonce S.A. la que en su flota tiene varias líneas de vehículos a saber, la línea 6000 con buses marca Mercedes, Scania y Volvo con el cumplimiento de normativa Euro II, línea 7000 con buses marca Chevrolet LV 150 que cumple la normativa Euro II, línea 8000 con buses Chevrolet y Scania de modelos 2015 en adelante y que cumplen la normativa Euro IV y finalmente línea 9000 exclusivamente con buses Scania de dos pisos que cumplen normativa Euro IV; esta empresa también envió los itinerarios y ciudades a las cuales hacen recorridos que son: Bogotá, Bucaramanga, Cúcuta, Cartagena, Barranquilla y Santa Marta; sin embargo, de acuerdo con la ruta de estudio (carreteras del Norte de Santander), y para mayor comodidad en las mediciones se escogieron las que transitaban por la 66 hasta Pamplona y por la ruta 55 hasta Cúcuta, es decir, el recorrido Bogotá Cúcuta y Cúcuta Bogotá. En las rutas seleccionadas, sólo transitan vehículos de las líneas: 6000 7000 y 8000 de esta empresa, ya que la línea 9000 esporádicamente era enviada por estas carreteras debido a las dimensiones del vehículo. Esto centró nuestra investigación en los vehículos de la línea 8000, los cuales son 22 en total, distribuidos entre las marcas Chevrolet y Scania.

3.4. MUESTRA

Para la muestra se tomaron trece vehículos Scania y seis vehículos Chevrolet además de un remanente de nueve vehículos que no cumplen la normativa Euro IV, pero que en este mercado son mayoría, de estos últimos el modelo Chevrolet LV 150 que cumple la normativa Euro II representa aproximadamente el 50% del total de vehículos de este tipo a nivel nacional, por este motivo, es importante tomar muestras a ese modelo, ya

que al compararlo muestra claramente cómo ha evolucionado las emisiones contaminantes luego de la entrada en vigencia del decreto 1111 de 2013 y cuál es el estado actual de las emisiones por esta ruta; también se debe tener en cuenta que estos modelos a pesar de no cumplir la normativa Euro IV permanecerán en circulación durante varios años más de vida útil.

3.5. TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

Toda la información que se requería para desarrollar este proyecto fue buscada en fuentes externas o recolectada directamente en la fuente para determinar los efectos que la variación de altitud tenía sobre las emisiones de motores diesel en vehículos de transporte pesado de pasajeros y que cumplieran la normativa euro IV.

3.5.1. Fuentes De Información Primarias

Las fuentes de información primarias que se utilizaron en esta investigación fueron los valores de emisiones que se midieron directamente en los buses seleccionados, además el de la temperatura del aire en el sitio donde se realizaba cada medición. Otra fuente primaria es la altitud medida mediante GPS y por medio de una aplicación telefónica, este valor sería luego confirmado con sistemas de información geográfica online.

3.5.2. Fuentes De Información Secundarias

En las fuentes de información secundarias constan de datos estadísticos tomados del ministerio del transporte y el ministerio de ambiente donde se describe el parque automotor Colombiano y específicamente las tendencias de crecimiento que tienen los vehículos de los cuales se tomaron datos, también pertenece a esta categoría la legislación colombiana e internacional que reglamenta los niveles de emisión y los decretos o resoluciones donde se dan los valores y condiciones específicamente para nuestro país. Otras fuentes de información secundarias fueron los datos solicitados y entregados por las compañías fabricantes y por los transportadores.

3.6. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

3.6.1. Instrumentos De Medidas

Para el proceso experimental y el desarrollo de la investigación se hizo necesario la utilización de diversos equipos especializados que servirán para la medición y el posterior estudio de los gases contaminantes.

3.6.2. Analizador de gases Bacharach PCA3

En las mediciones de contaminantes en ralentí de motores diesel de transporte pesado de pasajeros que se realizaron, fue utilizado el analizador de gases marca Bacharach modelo PCA3, ver Figura 3-1, con el que cuenta el semillero SEFISOLAR al cual pertenezco y que desarrolla otras investigaciones donde se analizan gases de combustión en calderas. Se midieron variables como monóxido de carbono (CO) y óxidos de nitrógeno NO_x en ralentí, este método de medida emisiones en ralentí para motores diesel no ha sido implementado nuestro país, esta es una gran oportunidad para posteriores proyectos de investigación y desarrollos de técnicas que faciliten la cuantificación de las emisiones contaminantes en motores diesel, [5].



Figura 3-1: Analizador de gases marca Bacharach modelo PCA 3 275, utilizado en este proyecto. Tomado de: El autor.

En la Figura se muestra el analizador de gases Bacharach PCA3 que se utilizó para este proyecto, este es un medidor de gases portátil, con un amplio rango de equipos con

posibilidad de ser medidos y la facilidad de tomar muestras en lugares apartados ya que funciona con un sistema de baterías comunes y su operación no requiere de reactivos u otros elementos o accesorios adicionales. Este equipo cuenta con certificación de calibración vigente.

3.6.2.1. Principio de funcionamiento

En la Figura 3-2 podemos observar la vista frontal del analizador de gases Bacharach en donde se distinguen las distintas teclas para el control de funciones del mismo, también se observa la parte donde se conectan los diferentes sensores y sondas que permite el ingreso de los gases que requieren ser analizados.

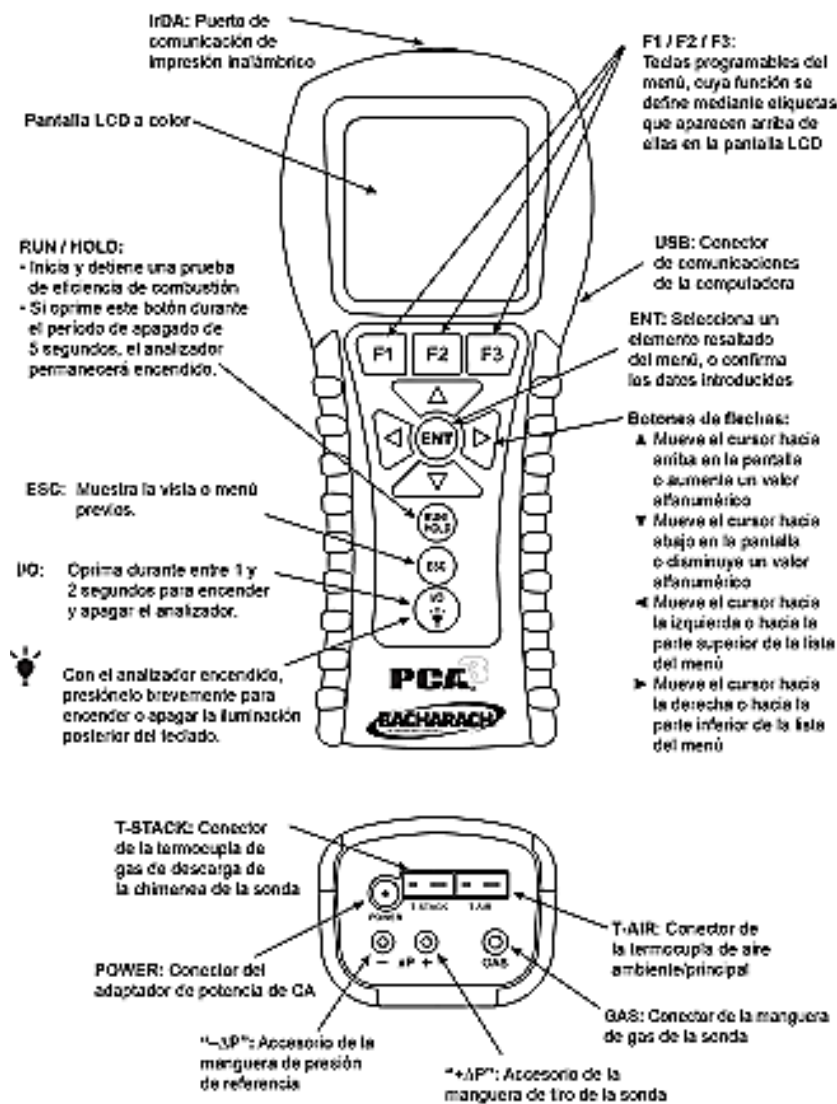


Figura 3-2: Vista frontal y lateral del analizador. Tomado de:[5].

En la parte posterior del analizador según la Figura 3-3 se observa el compartimento de las baterías junto con los cuatro sensores que permiten el adecuado análisis de los gases.

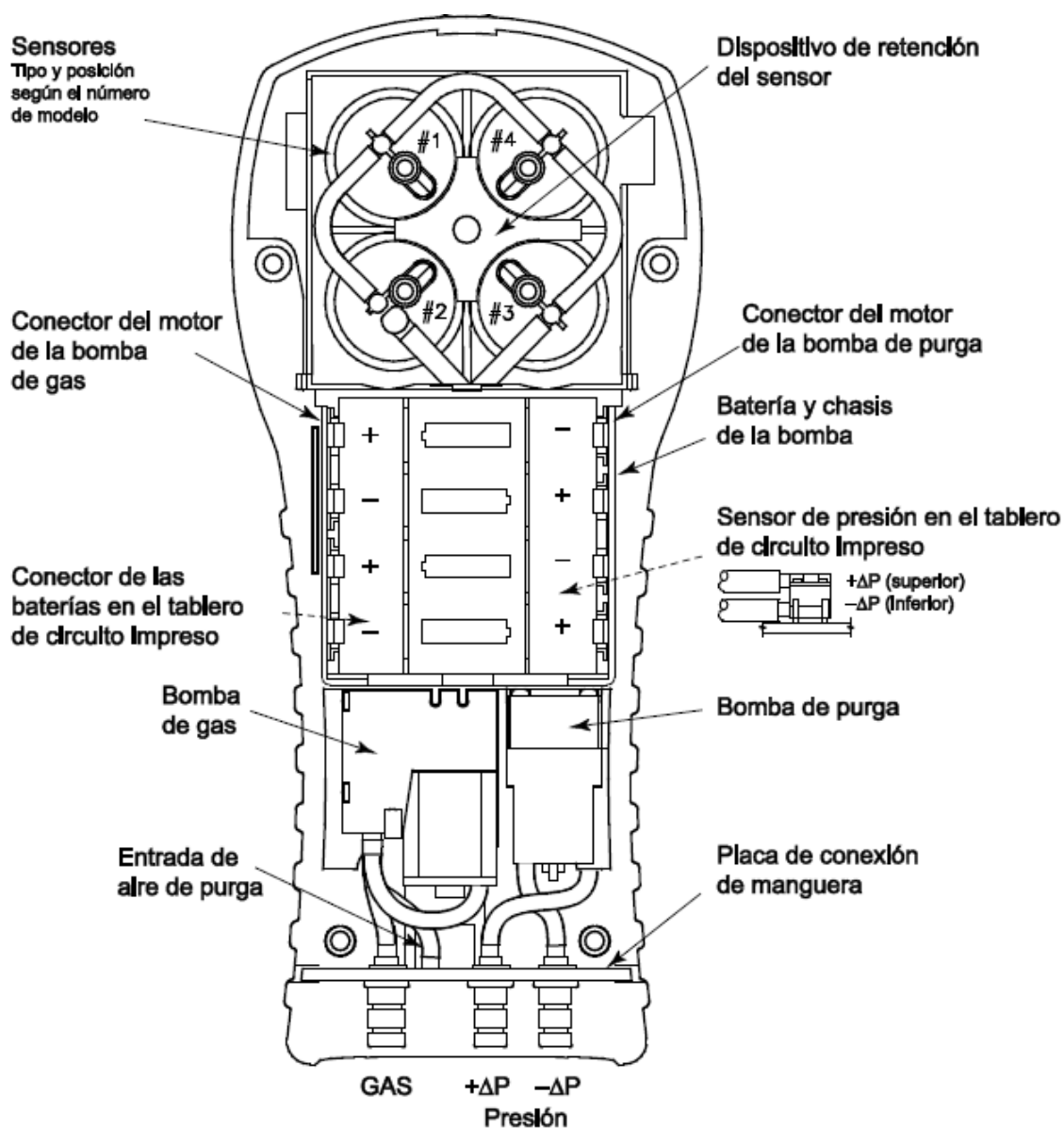


Figura 3-3: Vista interna del analizador de gases marca Bacharach modelo PCA 3 275, utilizado en este proyecto. Tomado de:[5].

En la Figura 3-4 se describe que en el caso de este modelo 275 se encuentran, en la posición uno el sensor de oxígeno (O_2), la posición dos el sensor de monóxido de carbono (CO) de bajo rango, la posición tres lo contiene un sensor de óxidos de azufre (SO_2) y la posición cuatro cuenta con un sensor de óxidos de nitrógeno (NO).

Modelos 265, 275 y 285
N.º de piezas 0024-7324, 24-7325 y 24-7326

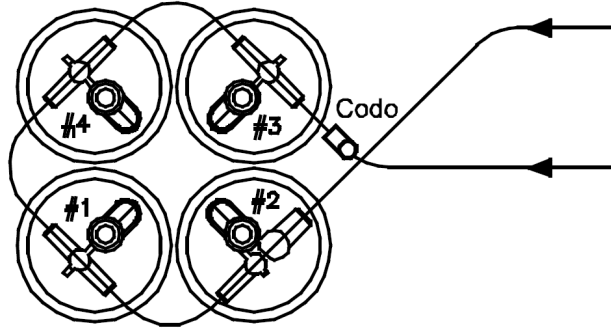


Figura 3-4: Posición de los sensores del analizador de gases marca Bacharach modelo PCA 3 275, utilizado en este proyecto. Tomado de:[5].

La sonda de medición cuenta con dos mangueras y un cable para la conexión de la termocupla, estos tres elementos finalizan en un tubo de aproximadamente 20 centímetros por donde ingresan los gases para su análisis, la sonda se debe conectar de tal manera que no se maltraten las juntas tóricas u O-ring que son los elementos utilizados para prevenir fugas, lo que puede llevar a lecturas inexactas.

En la manguera principal se encuentra instalado un filtro para partículas y agua, lo que previene que los sensores se contaminen exageradamente y se verá reducida su vida útil. La que no cumplía íntegra a la sonda es la que mide la temperatura de los gases de escape que como más adelante observaremos se vuelve una variable independiente este proyecto de investigación.

En la Figura 3-5 se muestra la forma de conexión del analizador de gases.

Luego de conectar la sonda para el análisis de gases y del calentamiento del analizador de gases que dura sesenta segundos, donde la bomba interna hace fluir aire desde el exterior, el analizador está listo para realizar las mediciones, al colocar la sonda en el tubo de los gases de escape y esperar el tiempo suficiente para que los valores se estabilicen ya se puede memorizar esta medición y ser guardada en el registro interno del analizador.

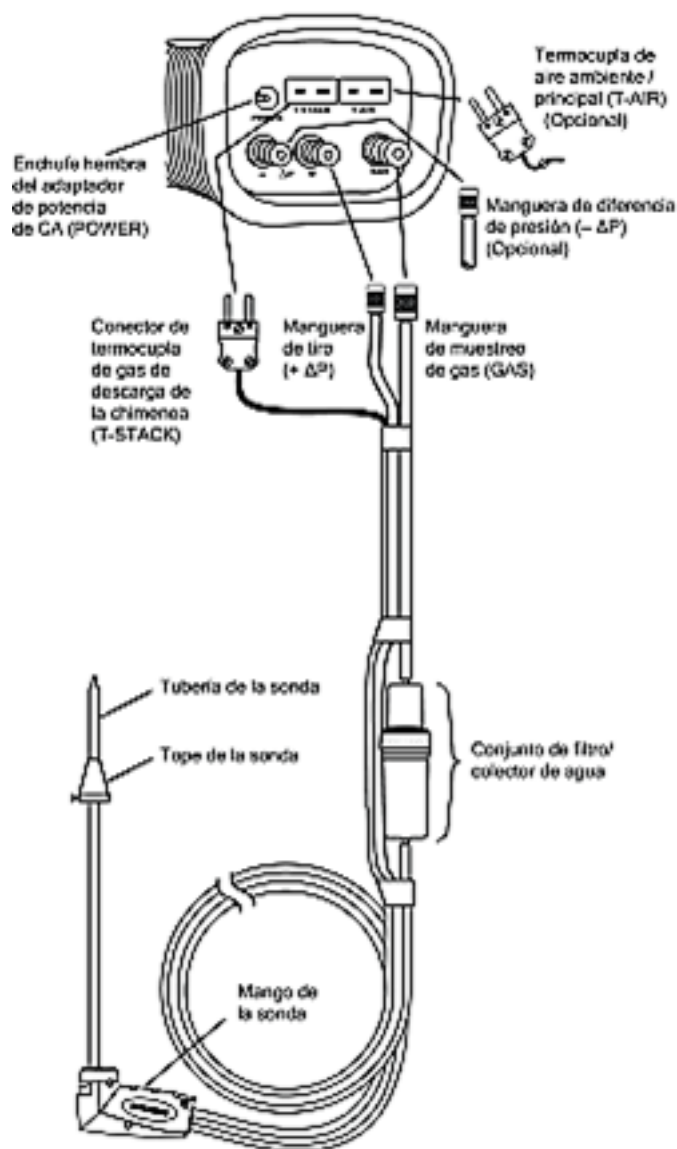


Figura 3-5: Conexión del analizador de gases marca Bacharach modelo PCA 3 275, utilizado en este proyecto. Tomado de:[5].

3.6.2.2. Precisión

En la tabla que provee fabricante el analizador de gases para aclarar la precisión del instrumento, esta precisión depende del rango en que se esté midiendo, específicamente para el sensor de monóxido de carbono (CO) de bajo rango que mide hasta 4000 ppm se tiene una precisión de más o menos el 10 partes por millón en mediciones hasta de 2000 partes por millón y para mediciones por encima de las 2001 y partes por millón se tiene una precisión de más o menos 10 %.

Para la temperatura este instrumento presenta una precisión de más o menos 2 grados centígrados en mediciones entre 0 grados centígrados y 124 grados centígrados, para mediciones entre 125 grados centígrados y 249 grados centígrados la precisión es de más o menos 3 grados centígrados y para medidas entre 245 grados centígrados y 400 grados centígrados la precisión es de más o menos 4 grados centígrados. En el caso del medidor de óxidos de nitrógeno la precisión esté más o menos 5 partes por millón.

Lectura	Precisión del desempeño
O ₂	±0.3% O ₂ en las concentraciones reales de gas de descarga de la chimenea (mezcla de O ₂ , CO ₂ y N ₂)
CO	Superior a ±5% de la lectura o ±10 ppm entre 0 y 2,000 ppm, ±10% de la lectura entre 2,001 y 20,000 ppm.
NO	Superior a ±5% de la lectura o 5 ppm
NO ₂	Superior a ±5% de la lectura o ±5 ppm entre 0 y 500 ppm
SO ₂	Superior a ±5% de la lectura o ±10 ppm entre 0 y 2,000 ppm
Temp. del gas de de desc. de la chimenea	±4 °F (±2 °C) entre 32 y 255 °F (0 y 124 °C) ±6 °F entre 256 y 480 °F (±3 °C entre 125 y 249 °C) ±8 °F entre 481 y 752 °F (±4 °C entre 250 y 400 °C)
Temp. del aire ambiente/principal	±2 °F entre 32 y 212 °F (±1 °C entre 0 y 100 °C)
Presión/tiro	±0.02 pulgadas de -1 a 1 inwc; ±2% de la lectura de -10 a 10 inwc; ±3% de la lectura de -40 a 40 inwc
Caudal del sistema con sonda	200 cc/min. mínimo

Figura 3-6: Precisión del analizador de gases marca Bacharach modelo PCA 3 275, utilizado en este proyecto. Tomado de:[5].

3.6.3. Termómetro digital Unit UT33C

El multímetro digital UNIT UT33C cuenta con opción de medir temperatura utilizando un accesorio tipo termocupla para medir temperaturas en sitios específicos externos y con este fin se utilizó en este proyecto para poder confirmar la temperatura del aire en los sitios donde se realizaban las mediciones, Cúcuta, Pamplona y el sitio conocido como la Viuda ó Ranchadero en el páramo de Berlín. En la Figura 3-7 se observa el multímetro digital UNIT UT33C.



Figura 3-7: Multímetro digital Unit UT33C, utilizado en este proyecto. Tomado de:[33].

3.6.3.1. Precisión

Este multímetro digital tiene una precisión de más o menos en 1 % para mediciones en grados Celsius y un rango desde -40 grados Celsius hasta 1000 grados Celsius, como se observa en la Tabla 3-1.

Tabla 3-1: Especificaciones de precisión. Tomada de [33].

<i>SPECIFICATIONS</i>	<i>RANGE</i>	<i>BEST ACCURACY</i>
Temperature °C	(-40 a 1000)	(+ - 1 %)
Temperature °F	(-40 a 1832)	(+ -1 %)

3.7. VARIABLES

3.7.1. Variables independientes

En la revisión teórica inicial que se realizó sobre los tipos de combustión en la Sección 2.3.4 se estudio que la altitud era responsable de buena parte de las variaciones de las

emisiones contaminantes de los motores de combustión interna, esto la convierte en la principal variable independiente de este proyecto ya que con altitud también varía la concentración de oxígeno y la presión atmosférica.

3.7.1.1. Altimetría

En la Figura 3-8 se observa el altimetría de la ruta seleccionada para la toma de datos donde punto más bajo estarán 325 m.s.n.m. y el más alto a 3268 m.s.n.m. abarcando de esta manera un amplio rango en el que se encuentran ciudades como Bogotá, Medellín y Cali. Con puntos negros se señalan las altitudes en las que se realizaron las mediciones.



Figura 3-8: Altimetría de la ruta Bogotá-Cúcuta. Tomado de: maps.

3.7.2. Variables dependientes

Como variables dependientes están los diferentes parámetros que se midieron con el analizador de gases Bacharach PCA 3, estos son:

- Monóxido de carbono (CO)
- Óxidos de nitrógeno (NO) y (NOx)
- Oxígeno (O₂)
- Óxidos de azufre (SO₂)

3.7.3. Variables intervinientes

La variable interviniente de este proyecto es la temperatura de los gases de escape, la cual está relacionada directamente con la temperatura de funcionamiento del motor y que determina la calidad de la combustión dentro del ciclo termodinámico. A pesar de encontrarse varios motores funcionando a la misma altitud o ciudad, la temperatura de funcionamiento no era siempre la misma, ya que dependía del tiempo en funcionamiento del vehículo (desde que fue encendido), algunos buses seguían la ruta desde Bogotá hacia la ciudad de Cúcuta y cuando se medían en esta última ciudad presentaban temperaturas de los gases de escape más altas que cuando estaban iniciando un recorrido en la ruta inversa (Cúcuta – Bogotá), caso en el cuál solamente habían recorrido la distancia desde el parqueadero de la empresa hasta el terminal, aproximadamente 4 kilómetros que contrastados con los 640 kilómetros desde Bogotá representaba una gran variación de la temperatura de funcionamiento del motor.

En la Figura 3-9 se evidencian las variaciones de temperatura de los gases de escape para los 13 vehículos Scania medidos en la ciudad de Cúcuta. Es de anotar que la variación de estas temperaturas tiene una influencia directa sobre los resultados de las variables independientes, la línea roja representa la tendencia que siguen los valores.

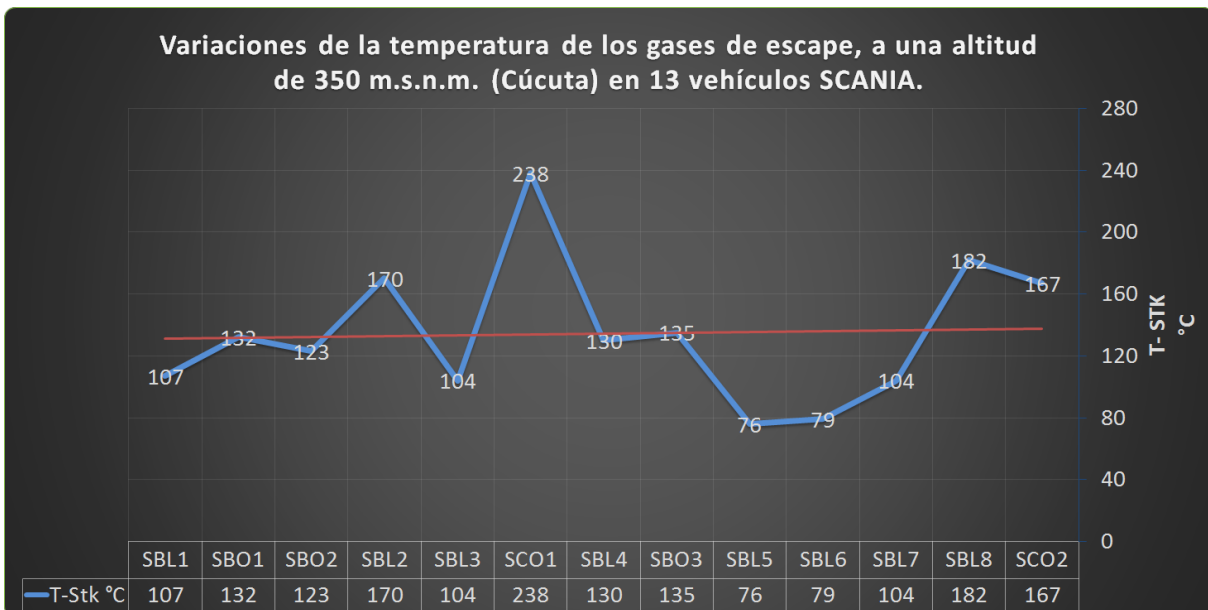


Figura 3-9: Variación de la temperatura de los gases de escape para 13 buses Scania. Tomado de: El autor.

3.8. METODOLOGÍA

En el desarrollo de este proyecto se llevaron a cabo cuatro fases ([10]) para llegar al resultado final:

- **Exploración.** Inicialmente se presentó una etapa exploratoria donde se encontró información de investigaciones relacionadas para dar una guía sobre cómo abordar el problema de investigación, a partir de este punto se acondicionó la información al contexto nacional en los casos necesarios, esto fue determinado por la legislación que rige actualmente en materia ambiental y de regulación del parque automotor y más específicamente del transporte pesado que en su mayoría se mueve con motores diesel.
- **Planeación.** A partir de allí se inició la etapa de planificación donde analizando los resultados de la primera fase y mediante observación, delimitando el problema a solucionar, se determinaron las variables más relevantes a considerar. Utilizando el diseño de experimentos como herramienta para definir la muestra a estudiar según las necesidades, se definió qué y cómo medir, especificando claramente las condiciones en que se debe llevar a cabo y con una secuencia lógica donde se evidencie el análisis de todas las variables para evitar desperdicio de recursos o datos erróneos que interfieran negativamente en el resultado ya que esta información puede ser utilizada para la toma de decisiones ingenieriles y administrativas en pro de una mejor calidad de vida para las comunidades involucradas y una etapa productiva de los motores estudiados más amplia, disminuyendo así los altos costos innecesarios que asumen los transportadores con vehículos no aptos para nuestras condiciones topográficas. Aquí también se determinó como adquirir los resultados de emisiones en ralentí de motores a gasolina realizadas en CDA Colombianos.
- **Ejecución.** En la tercera etapa se ejecutaron las tareas planificadas y para este fin se dispuso de recursos económicos que permitieron realizar los desplazamientos a los sitios establecidos donde se tomaron las mediciones, esto exigía que se cumpliera toda la logística para no intervenir en el desplazamiento de los buses a medir.
- **Análisis e interpretación de los datos obtenidos.** La cuarta y última etapa contempló el análisis de la información que se adquirió y la que se midió directamente los buses, para determinar el grado de influencia de las variables en los niveles de contaminación de estos motores, conjuntamente se compararon los resultados medidos en motores diesel contra los adquiridos de motores a gasolina equivalentes según sus especificaciones.

La Figura 3-10 muestra el esquema metodológico usado.



Figura 3-10: Metodología propuesta. Tomado de: El autor.

Con el fin de dar cumplimiento a los objetivos propuestos, se planteó realizar las siguientes actividades por objetivo, ver Tabla 3-2:

Objetivo	Actividades
Definir el diseño de experimento apropiado para realizar mediciones a diferentes alturas (m.s.n.m.) de las emisiones de buses interdepartamentales que cubren las rutas desde el norte de Santander.	I. Analizar el parque automotor Colombiano, para determinar sobre qué grupo trabajar. II. Documentar la legislación Colombiana actualizada que reglamenta el parque automotor. III. Seleccionar el tipo de vehículos de carga pesada diesel que deben ser medidos.
Sigue en la página siguiente...	

Objetivo	Actividades
	IV. Realizar el diseño de experimento que se utilizará en la investigación a fin de determinar la muestra representativa.
Medir en condiciones reales de funcionamiento las emisiones del motor diésel, generadas en ralentí a diferentes altitudes, de buses interdepartamentales que cubren las rutas desde el norte de Santander, mediante el analizador de gases Bacharach PCA3.	V. Solicitar autorización de las empresas de transporte interdepartamental de pasajeros.
	VI. Establecer los puntos más adecuados a diferentes altitudes para realizar las medidas. VII. Planificar la logística para los días que se realizarán las mediciones. VIII. Ejecutar las mediciones en los días y lugares planeados.
Documentar los resultados de las pruebas dinámicas realizadas por los fabricantes de los motores diésel (Scania y Chevrolet), donde la casa matriz evidencia el cumplimiento a la normativa Euro IV.	IX. Solicitar a las empresas distribuidoras de los vehículos estudiados los resultados de las pruebas realizadas para dar cumplimiento a la normativa Colombiana sobre emisiones.
Analizar y estudiar los resultados de las mediciones del motor diésel, operando en ralentí, de los buses interdepartamentales y que cubren las rutas desde el norte de Santander, cuantificando el efecto que tiene la diferencia de altura sobre los niveles de contaminación.	X. Comparar y analizar los datos obtenidos en las pruebas.
	XI. Analizar los efectos de la altitud en las emisiones contaminantes de los motores diesel estudiados.
Sigue en la página siguiente...	

Objetivo	Actividades
Adquirir algunos resultados de pruebas de emisiones realizadas en Colombia por centros de diagnóstico automotor, de motores a gasolina operando en ralentí.	<p>XII. Seleccionar vehículos con motor a gasolina que por sus características sean comparables con los diesel medidos en cuanto a emisiones.</p> <p>XIII. Solicitar a algunos CDA los registros de resultados en la prueba de gases para los vehículos seleccionados.</p>
Comparar los datos obtenidos mediante el analizador de gases Bacharach PCA3 de buses con motor diesel interdepartamentales que cubren rutas desde el norte de Santander y su equivalente con los valores suministrados de motores a gasolina.	<p>XIV. Documentar la legislación de algunos países en los que están reglamentadas las condiciones de funcionamiento en ralentí de vehículos con motor diesel.</p> <p>XV. Comparar y analizar los datos obtenidos en las mediciones de los motores diesel con los datos adquiridos en los CDA.</p> <p>XVI. Determinar las diferencias y concluir sobre los niveles de contaminación emitidos en ralentí de motores diésel y gasolina.</p> <p>XVII. Construcción del libro final de trabajo de grado.</p>

Tabla 3-2: Actividades propuestas para cada objetivo.

Tomado de: El autor.

3.9. DISEÑO DEL EXPERIMENTO

A partir del análisis que se realizó del parque automotor colombiano, se logró determinar el grupo de vehículos sobre el cual se debería trabajar, dando como resultado los buses descritos en la población y la muestra. A partir de allí, se hizo una revisión bibliográfica de la normativa colombiana referente a las emisiones contaminantes de motores diesel, lo cual redujo aún más el grupo a estudiar, ya que para darle vigencia al proyecto se debía tener en cuenta la última normativa aplicada (EURO IV). Con el tipo de vehículos, ya

seleccionados, se realizaron solicitudes a las empresas de transporte pesado de pasajeros que transitaban las principales rutas del departamento, con el fin de que autorizaran la toma de medidas en sus vehículos.

También era necesario establecer los puntos más adecuados respecto a la altitud para realizar la toma de medidas, esto implicaba seleccionar puntos logísticamente viables y que a la vez fueran representativos de las condiciones topográficas en que mueven los vehículos Colombianos, a partir de allí, se procedió con la planificación de las jornadas en que serían medidos los buses ya que estas jornadas implicaban mínimo doce horas de trabajo continuo. Posteriormente, se procedió a estudiar las rutas y horarios que seguían esos vehículos de diferentes empresas para buscar los puntos donde coincidían dos o más vehículos y de esta manera realizar allí las mediciones de una manera más rápida.

Otro factor importante a considerar era la movilidad, ya que medir un vehículo y moverse en el mismo a través de las diferentes altitudes era un procedimiento muy lento que significaba medir solamente dos vehículos en cada jornada, este inconveniente fue resuelto utilizando una motocicleta para los traslados durante las mediciones y de esta manera optimizar la utilización del analizador.

Adicionalmente, se seleccionaron vehículos con motor a gasolina de los cuales se compararía sus niveles de emisiones contaminantes en ralentí para algunos parámetros con los valores obtenidos de motores diesel en ralentí y se solicitó a los centros de diagnóstico automotor, CD,A los resultados del análisis de gases que se le ha realizado a estos vehículos.

3.9.1. Ruta para la toma de datos

La ruta para la toma de datos fue seleccionada según el itinerario que seguían los vehículos para evitar que al interceptarlos al realizar la medición se retrasaran en su recorrido y se generarán inconvenientes con los conductores o la empresa, por esto se seleccionó el terminal de Cúcuta, el terminal de Pamplona y el paradero en el páramo donde normalmente los vehículos se detenían para que los pasajeros cenaran, por este motivo claro lo largo no fue posible realizar la medición en el punto más alto de la ruta a 3400 m.s.n.m. ya que en ese punto los vehículos no se detenían.

En la Figura **3-11** se observa la ruta seleccionada con una longitud total de aproximadamente 120 kilómetros.

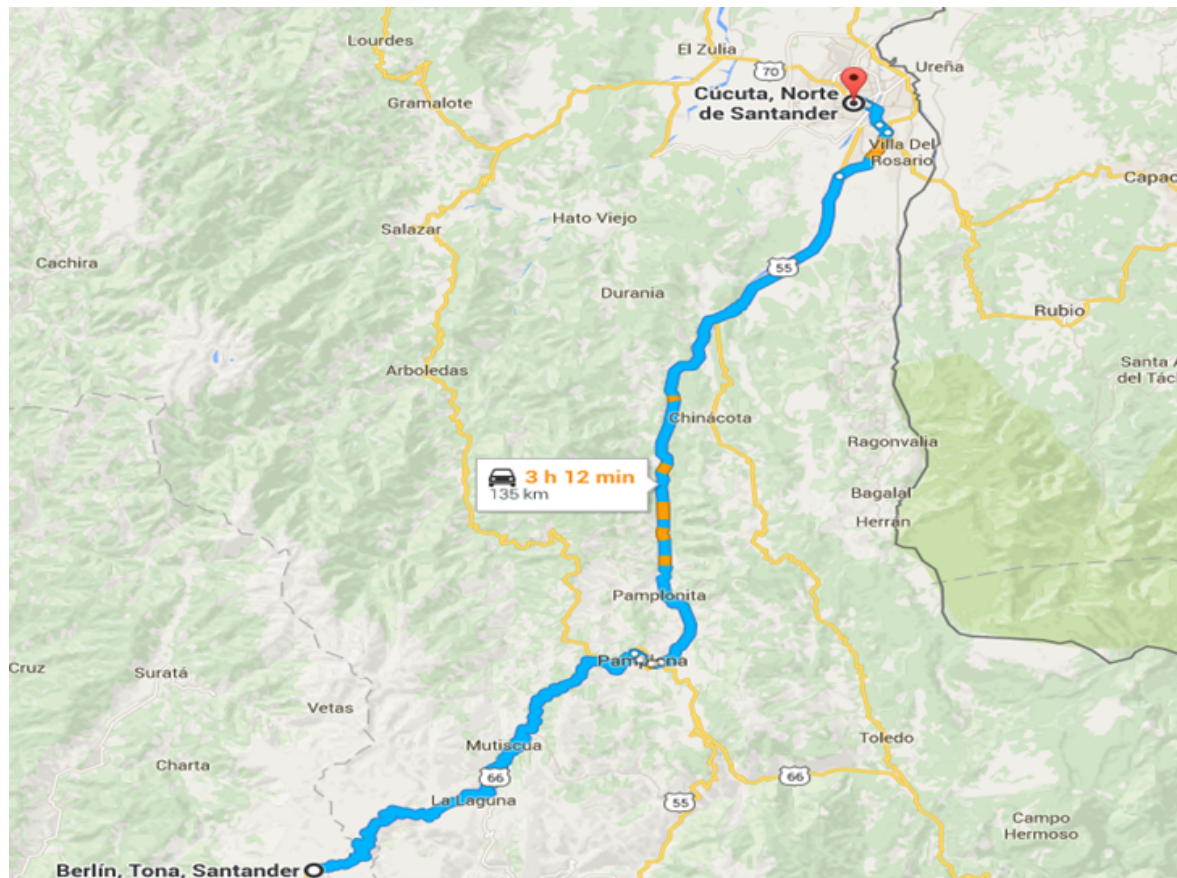


Figura 3-11: Mapa de la ruta donde se realizaron las medidas. Tomado de: El autor.

3.9.2. Toma de datos

Para la toma de datos en las siete jornadas programadas en los sitios especificados, se siguió el siguiente itinerario: Como me encontraba en la ciudad de Pamplona y se debía iniciar la toma de medición al mismo vehículo en la ciudad de Cúcuta cual el paradero en el páramo, se realizó un primer desplazamiento de 42 kilómetros ascendiendo a 3268 m.s.n.m. para estar en este punto a las 7:00 am, allí se realizaría la primera medición de vehículos que transitaban hacia la ciudad de Cúcuta. Luego se descendía la misma distancia hasta la ciudad de Pamplona y en el terminal de ésta se tomaba la segunda medición de los mismos vehículos que se registraron en el páramo, de éste punto se hacía un recorrido de 75 kilómetros hasta la ciudad de Cúcuta pasando de 2342 m.s.n.m. a 325 m.s.n.m. y se realizaba la última medición a los vehículos medios anteriormente, la finalización de esta recorrió se daba alrededor de la 1:00 pm, lo cual daba el tiempo suficiente para iniciar el recorrido en sentido contrario.

A las 2:00 pm en el terminal terrestre se contactaban los vehículos que se disponían a

salir de la ciudad y se realizaba la primera medición. Cuando los vehículos salían del terminal se realizaba el recorrido de 75 kilómetros hasta la ciudad de Pamplona ascendiendo aproximadamente 2000 metros y en el terminal se realizaba la segunda medición de los mismos vehículos alrededor de las 4:30 pm, para finalmente ascender a los 3268 m.s.n.m. hasta el paradero en el páramo y tomar la tercera medida para así completar la secuencia que finalizaba hacia las 6:30 pm, desde donde se regresaba a la ciudad de Pamplona.

Siguiendo el procedimiento de la norma NTC 4231 sobre medición de gases para motores diesel en Colombia, se realizaron las mediciones, verificando que los gases de escape se encontraran a una temperatura mínima de 50 grados centígrados para garantizar que las mediciones fueran válidas.

Otro aspecto que se verificó fue que el motor no se encontrara acelerado por causa de elementos externos accesorios como el aire acondicionado, en el caso de los de los buses Scania el ralentí se mantiene a 500 revoluciones por minuto (rpm) y en los Chevrolet a 700 rpm [17].

En las Figuras 3-12, 3-13, 3-14, 3-15 y 3-16 se observan las evidencias del procedimiento realizado en algunas de las jornadas de medición.



Figura 3-12: Registro de los datos en el analizador. Tomado de:El autor.



Figura 3-13: configuración del analizador para la toma de datos. Tomado de:El autor.



Figura 3-14: Estabilización del aparato durante la toma de datos. Tomado de:El autor.



Figura 3-15: Finalización de la medición con el analizador. Tomado de:El autor.

En los días que se realizaron las mediciones, uno de los principales inconvenientes logísticos fue la gran cantidad de buses Chevrolet LV 150 que no cumplen la normativa Euro IV y por tanto no se ajustaban a las características que se buscaban en el proyecto. En algunos casos se debía esperar varias horas para encontrar los modelos requeridos y esto modificaba toda la logística para ese día, en la Figura 3-16 tomada en el páramo, aparecen 4 buses de los cuales solamente los dos más cercanos cumplen la normativa Euro IV. .



Figura 3-16: Registro de los buses encontrados. Tomado de:El autor.

3.10. VALIDEZ Y CONFIABILIDAD

La validez y confiabilidad en las mediciones están dadas en gran parte por la precisión de los aparatos usados y por los métodos de medición que se usaron. Así mismo, se demuestra la validez de la metodología y cálculos empleados, que son la base de la evaluación de la fiabilidad.

Capítulo 4

ANÁLISIS DE DATOS Y RESULTADOS.

4.1. ANÁLISIS DE LOS DATOS OBTENIDOS DE LAS PRUEBAS EXPERIMENTALES.

Inicialmente se clasificaron los datos según los distintos tipos de vehículos que se midieron, para el caso de Colombia el mercado solamente cuenta con dos proveedores representativos en esta gama de vehículos de transporte pesado de pasajeros: Scania y Chevrolet, quienes son los proveedores de los motores y todo el tren mecánico, independientemente del tipo o marca de carrocería que le sea instalada en nuestro país, esto se realiza así para disminuir costos en aranceles de importación ya que no se ingresa un producto terminado (chasis y carrocería) sino que se importa solamente el chasis como insumo de las industrias carroceras.

Se han separado los resultados medidos en tres categorías a saber:

- Scania

- Chevrolet

- Otros

En la categoría Scania se tienen trece (13) vehículos donde se combinan dos modelos de la misma marca: K360 y K410 que para fines de este proyecto sobre análisis de emisiones a diferentes altitudes son similares, las características de sus motores son las que aparecen en la Figura 4-1.

Motor

Motor diesel de inyección directa con 6 cilindros en línea, sistema de inyección Scania PDE con inyectores bomba, 4 válvulas por cilindro, turbo, intercooler y Scania SCR, nivel de emisiones Euro 4, cilindrada de 13 litros.

DC 13 104 360

Motor

SCANIA DC13 104 (Euro 4) SCR.

Torque

1,365 lb-pie (1850 Nm) @ 1000-1300 rpm.

Potencia

360 hp (265kW) @ 1900 rpm.

- Preparado para 83 dBA.
- Separador de agua combustible.
- Limitador de velocidad a 100 km/h.

Sistema de enfriamiento

- Radiador con tanque de expansión, ventilador de enfriamiento regulado por temperatura, controlado hidráulicamente.

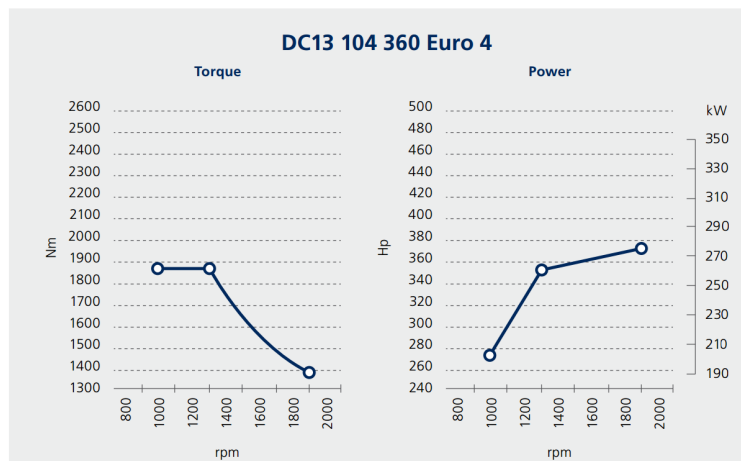


Figura 4-1: Características de Scania K360. Tomado de:[32]

En la categoría Chevrolet hay una muestra de seis (6) vehículos y existen dos modelos de chasis que son: LV 152 y LV 452, que presentan la misma motorización con un modelo de motor 6WG1TC y características que se muestran en la Figura 4-2, [9].

MOTOR	
Marca / Código	6WG1TC (DOC)
Ubicación	Trasero Longitudinal
Desplazamiento (cc)	15.681
Nro. de Cilindros	6 en línea
Potencia (hp @ rpm)	375 / 1.900
Torque (kg-m @ rpm)	145 / 800-1.800
Alimentación	Inyección Directa
Sistema de Inyección	Common rail
Nivel de Emisiones	Euro IV
Combustible	Diesel

Figura 4-2: Características de motor Chevrolet. Tomado de: [9]

En la categoría otros, se encuentran nueve (9) vehículos que no cumplen con la normativa Euro IV, ya que son de modelos anteriores a la expedición del decreto que ordenaba a los motores diesel que se comercialicen en Colombia cumplir con esta versión de la norma. Allí se encuentran seis (6) vehículos Chevrolet LV 150 que cumplen con la norma Euro II, pero debido al gran número de ellos, que aún circulan, que se estima en un 50% del total de este tipo de vehículos de transporte de pasajeros, se tuvo en cuenta en la recolección

de datos y su respectivo análisis, con estos datos se puede tener un punto de comparación entre las condiciones anteriores y posteriores al decreto que exige el cumplimiento de la normativa Euro IV para los motores diésel nuevos que se comercialicen a partir del año 2015.

Cabe aclarar, que en su momento Chevrolet con su modelo LV 150 tuvo el 80 % del mercado alrededor del año 2004 y otros ofertantes como Mercedes Benz y Volvo se disputaban el 20 % restante. Cuando Scania ingresó al mercado Colombiano inició con un 2 % del mismo y en el año 2014 ya se encontraba alrededor del 50 % de participación; mientras que Chevrolet para este mismo año tenía un 30 % del mercado, el 20 % restante se lo disputaban marcas como Mercedes Benz y Volvo.

Es evidente que las nuevas disposiciones como la resolución 1111 de 2013, cambiarán las cuotas de mercado en este sector y se espera que las condiciones de seguridad y confort mejoren para los usuarios al mismo tiempo que se regulen los niveles de contaminación emitidos a la atmósfera. Esto mejorará la calidad de vida de las poblaciones por las que circula el transporte y las personas involucradas en este sector tan importante para una economía globalizada.

4.1.1. Codificación de los vehículos para su fácil interpretación

En la Tabla 4-1 se observa la codificación utilizada para diferenciar cada uno de los vehículos medidos donde la primera letra puede tomar los siguientes nomenclaturas: S para Scania, C para chevrolet y O para los remanentes. Las siguientes dos letras representan la empresa de transporte pesado de pasajeros a la que pertenece el vehículo y puede tomar la siguiente nomenclatura: CO para Copetran, BL para Berlinas del Fonce, BR para Brasilia y BO para Bolivariano. El último número es un consecutivo que aumenta cuando se presentan buses con las mismas características y pertenecientes a la misma empresa.

Tabla 4-1: Codificación de los buses para su posterior análisis.

CODIFICACIÓN DE LOS BUSES PARA EL ANÁLISIS		
X	YY	Z
S: Scania C: Chevrolet O: Otros	CO: Copetran BL: Berlinas BR: Brasilia O: Omega	Número consecutivo

4.1.2. Variación de los parámetros medidos bajo iguales condiciones

Cuando se clasificaron los datos recolectados con el analizador de gases Bacharach PCA 3 se evidenció una diferencia significativa en los valores de temperatura de los gases de escape y a la vez, diferencias relacionadas entre los valores de monóxido de carbono (CO) y óxidos de nitrógeno (NOx), todo esto, para un mismo valor de altitud que se suponía sería la única variable independiente y a partir de la cual variarían los valores medidos, pero este comportamiento por fuera de lo esperado según la teoría, se explica por el procedimiento y las condiciones en que se encontraba el vehículo en el momento de realizar la medición. La Figura 4-3 representa las fluctuaciones de los valores de monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NOx, NO) y temperatura de los gases de escape para una misma altitud (350 metros, Cúcuta). Los datos medidos se muestran en el Anexo A.

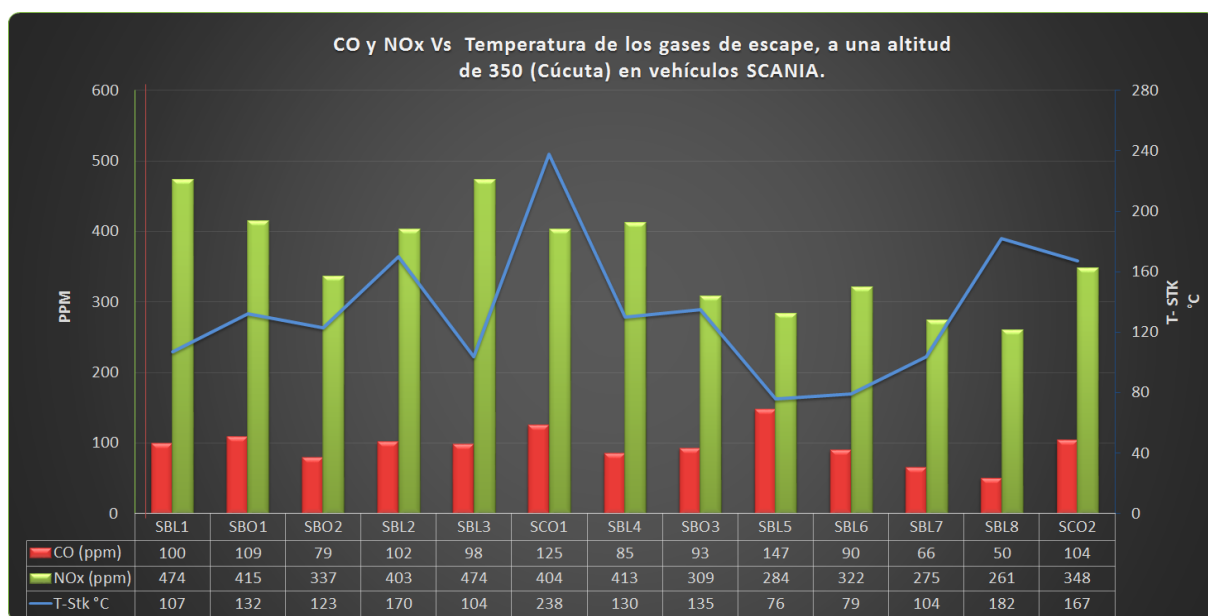


Figura 4-3: Variaciones para una misma altitud. Tomado de: El autor.

En la figura anterior se puede ver claramente que las temperaturas de los gases de escape representadas por la línea azul fluctúan desde 80 hasta 240 grados Celsius, un rango bastante amplio teniendo en cuenta que los vehículos se encontraban en la misma ciudad y bajo condiciones similares, estos cambios se deben a los tiempos durante los cuales el motor estuvo bajo carga, lo que garantiza la operación a temperaturas para las que fue diseñado y bajo las que se presentan los valores de contaminación calculados por el fabricante.

La temperatura de los gases de escape se comporta como una variable interviniente y juega un papel importante en los valores de monóxido de carbono (CO) y óxidos de nitrógeno (NOx), estos cambios según la teoría sobre la combustión se presentan de forma distinta para cada parámetro. En el caso del monóxido de carbono (CO), una temperatura de operación baja no asegura una buena combustión e incrementa las emisiones de CO considerablemente; mientras que para los óxidos de nitrógeno se opera de manera contraria, disminuyendo las emisiones de NOx gracias a la baja temperatura, lo que concuerda con la teoría sobre la generación de este contaminante [24],[29], que presenta mayores niveles cuando la temperatura de operación es alta. Esto da lugar a difíciles decisiones respecto al diseño de los motores, pues se busca una mejor combustión a mayores temperaturas hasta donde las propiedades físicas de los materiales lo permitan, pero sin incrementar los efectos dañinos, que sobre la salud y la naturaleza, se presentan con la combustión[35].

En la Figura 4-4 se presentan el mismo tipo de variaciones en los motores utilizados por chevrolet, en la ciudad de Cúcuta con una altitud de 350 metros, se nota la relación entre la mayor temperatura de funcionamiento y la generación de NOx al mismo tiempo que la disminución del CO gracias a una mejor combustión.

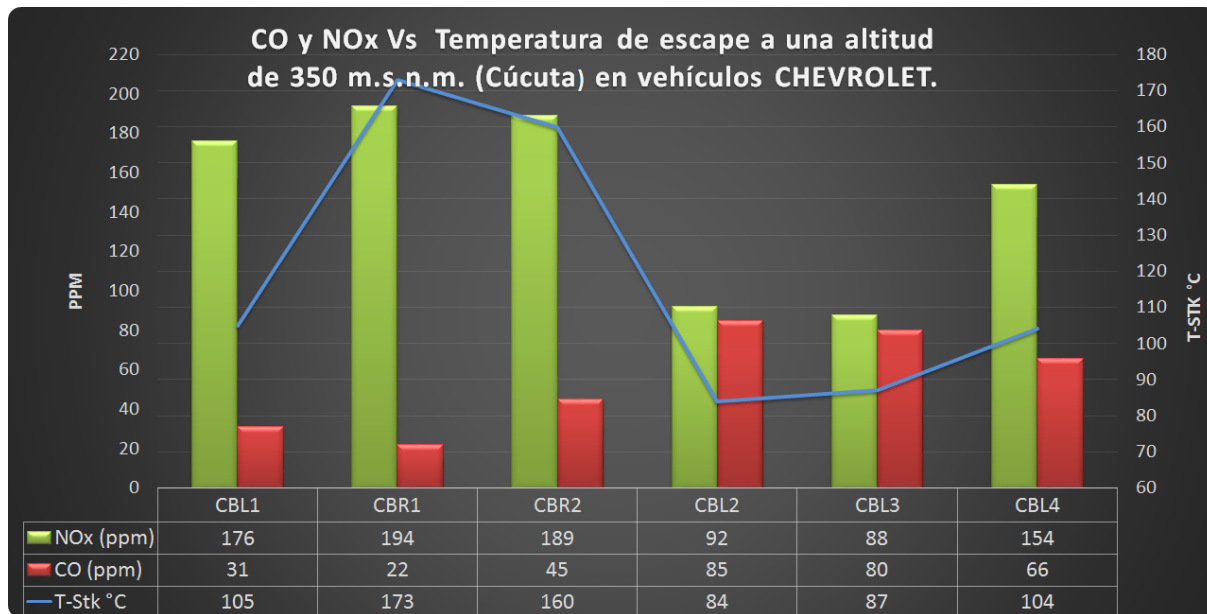


Figura 4-4: Variaciones de temperaturas de escape y emisiones para una misma altitud en motores chevrolet. Tomado de: El autor.

Vemos en la Figura 4-4, que para los primeros tres vehículos chevrolet a una altitud de 350 metros (Cúcuta), se aumentan considerablemente los niveles de NOx cuando aumentan los valores de la temperatura de escape, mientras que para los tres últimos cuando

la temperatura de escape disminuye, las emisiones de NOx también presentan la misma tendencia.

Sucede lo contrario con las emisiones de CO, para los tres primeros buses con una temperatura de trabajo más alta los niveles de CO disminuyen como se aprecia en las barras rojas y en los tres últimos con temperaturas de escape bajas la combustión no tiene la misma calidad y los niveles de monóxido de carbono (CO) son mayores.

4.1.3. Comparativa entre marcas y sistemas

En la Figura 4-5 se realiza una comparación entre las dos marcas estudiadas que cumplen la normativa Euro IV.

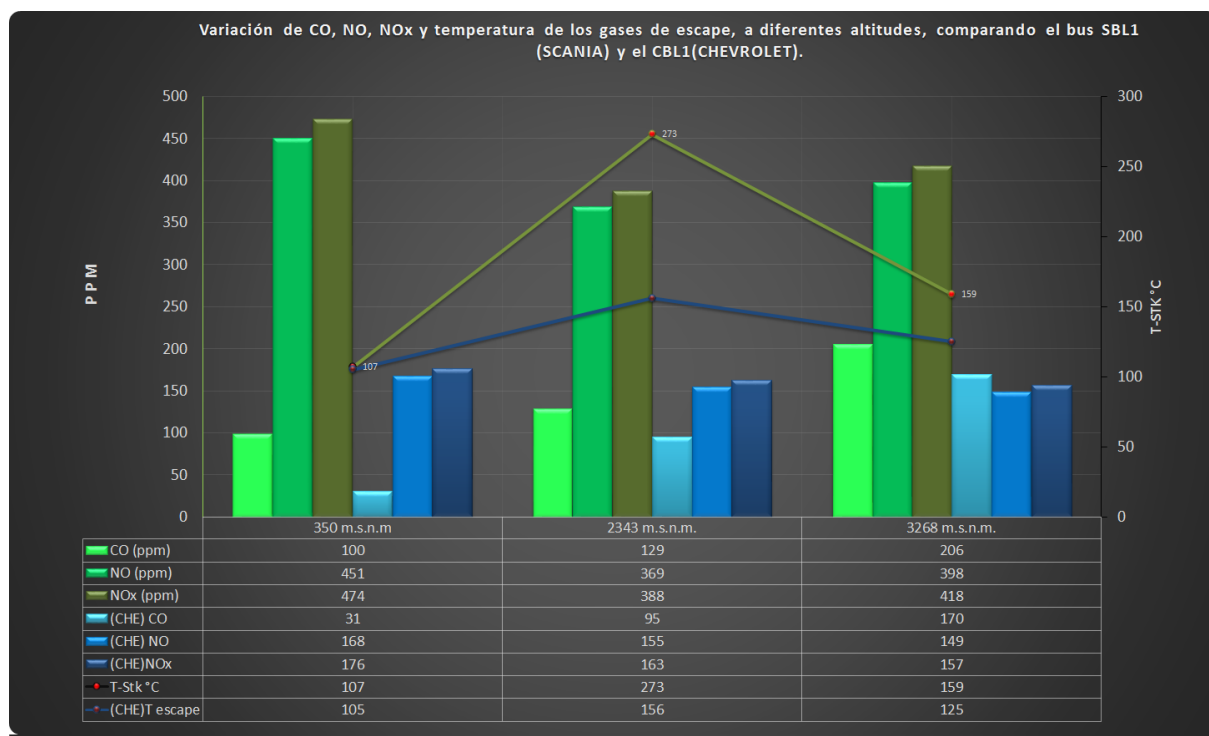


Figura 4-5: Comparativa de marcas y sistemas de control de emisiones. Tomado de: El autor.

Con el fin de facilitar el análisis se representó mediante barras verdes la marca Scania para el bus SBL1 y con las barras azules la marca Chevrolet para el bus CCBL1, este análisis comparativo se realizó únicamente con dos buses, dado que de la muestra eran los únicos dos vehículos que tenían temperaturas de trabajo similares, lo que permitía

que las curvas de temperaturas partiera del mismo punto a fin de analizar las emisiones para cada marca. La temperatura de trabajo de estos dos carros era similar dado que no estaban ingresando a la ciudad después de muchas horas de trabajo continuo, sino que, se disponían a salir de ella y el único recorrido que habían realizado antes de la medición era desde el parqueadero de la empresa hasta la terminal de transportes.

Cada grupo de valores representaba en su orden de izquierda a derecha: monóxido de carbono (CO) con la barra más clara, óxidos de nitrógeno (NO) con la barra central y el total de óxidos de nitrógeno (NOx) con la barra más oscura a la derecha, la escala de valores para estos tres parámetros se encuentra ubicada en el eje vertical primario hacia la parte izquierda, utilizando como unidad de medida las partes por millón (ppm). En el eje vertical secundario se encuentra la escala de valores para la temperatura de los gases de escape en grados centígrados que dentro de la gráfica están representados por las líneas de color verde para el bus Scania y de color azul para el bus Chevrolet. En la altitud de la ciudad de Cúcuta, se midieron 100 ppm de monóxido de carbono (CO) en el bus Scania contra 31 ppm para el bus Chevrolet. Estas diferencias suponen una combustión más completa en el bus marca Chevrolet, lo cual puede ser atribuido al sistema de catalizador oxidativo para vehículos diesel (DOC), el que usa la marca Chevrolet, que en este caso, es más eficiente que el sistema de reducción con catálisis selectiva (SCR) que utiliza urea diluida al 32 %, comúnmente llamada Ad Blue instalado en el vehículo Scania.

4.1.4. Cambios a partir de la Resolución 1111 de 2013

En la Figura 4-6 se pueden visualizar los cambios generados con la entrada en vigencia de la Resolución 1111 de 2013, la cual determina la normativa que deben cumplir los vehículos con motores diesel a partir del año 2015. En la figura se representan con barras verdes los vehículos de Scania que cumplen la normativa Euro IV, en barras azules se representan los vehículos marca Chevrolet que cumple la normativa Euro IV y en barras naranjas se representan los vehículos marca Chevrolet de modelos anteriores que cumplen la normativa Euro II y que actualmente alcanzan el 50 % del total de vehículos en circulación. Al comparar las mediciones de los vehículos los vehículos Chevrolet se observa una reducción considerable en las emisiones de monóxido de carbono (CO), dado que para los vehículos que cumplen normativa Euro IV se observó una reducción del 62 % en estas mediciones en la ciudad de Cúcuta frente a los vehículos que cumplen la normativa Euro II, una reducción del 54 % para las mediciones realizadas en la ciudad de Pamplona y de 46 % para las mediciones realizadas en el páramo. La reducción de las emisiones antes mencionadas se podrían atribuir a la entrada en vigencia de la Resolución 1111 de 2013.

Esta misma tendencia se observó para los óxidos de nitrógeno (NOx) con una reducción

del 52 % para las mediciones realizadas en la ciudad de Cúcuta, 60 % para las mediciones realizadas en la ciudad de Pamplona y de 67 % para las mediciones realizadas en el páramo. Con esta considerable reducción también se observa que a pesar de que los vehículos Scania cumplen con la normativa Euro IV sus niveles de contaminación son más elevados que los vehículos Chevrolet LV 150.

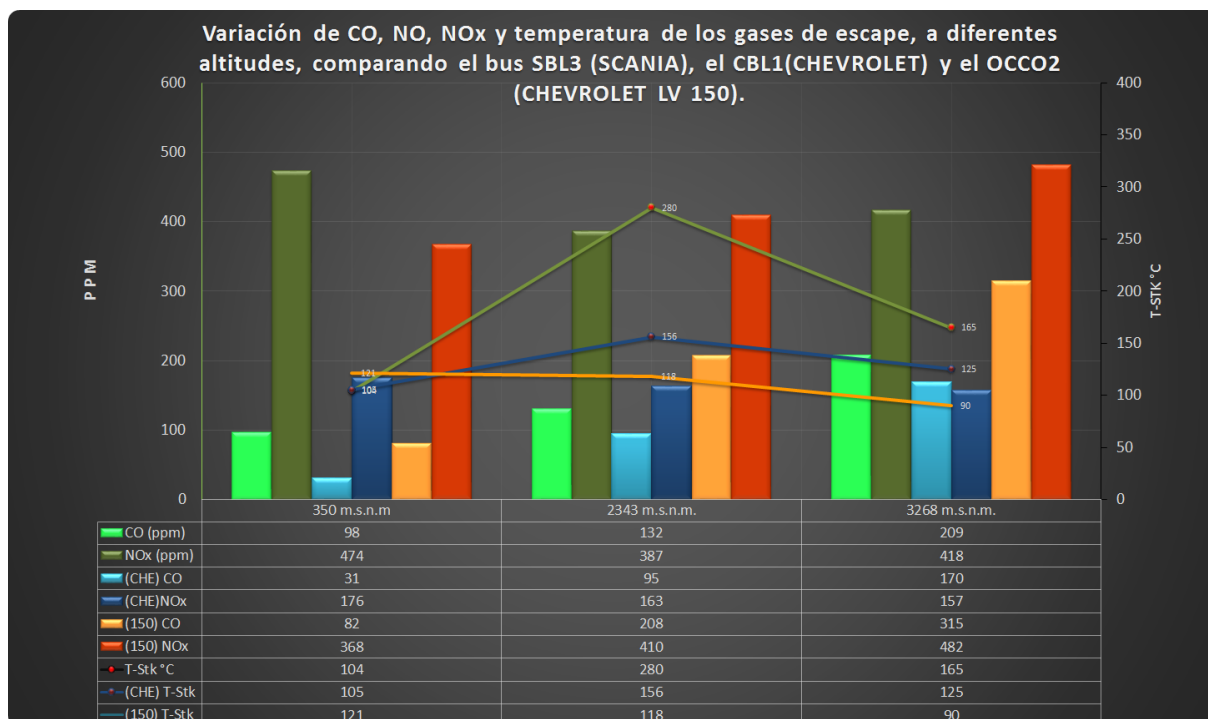


Figura 4-6: Comparativa de marcas y sistemas CHEVROLET antes y después del decreto 1111 de 2013. Tomado de: El autor.

En la Figura 4-7 se pueden apreciar los valores de emisiones de dos modelos de la marca Scania que presentan las mismas condiciones de trabajo. Antes y después de la entrada en vigencia de la Resolución 1111 de 2013, el modelo K310 que cumple con la normativa Euro III representado con barras de tonalidad amarilla y el modelo K 360 que cumple con la normativa Euro IV representado con barras de tonalidad verde, también se observan las líneas que representan las temperaturas de escape con las mismas tonalidades respectivas. Para el monóxido de carbono (CO) se aprecia una disminución del 23 % en la ciudad de Cúcuta, para la ciudad de Pamplona estos valores disminuyeron un 33 % y en el páramo este contaminante disminuyó 21 %.

Lo mismo sucede con los óxidos de nitrógeno totales (NOx) que según las mediciones hechas en la ciudad de Cúcuta disminuyeron 14 %, en Pamplona la reducción fue de 19 % en el páramo se redujo 8 %. Estas reducciones se dieron gracias a la evolución en la nor-

mativa, acompañada de políticas públicas que buscan mejorar la calidad de vida de la población.

A nivel mecánico, la diferencia de emisiones se dio principalmente por la utilización del sistema de reducción por catálisis selectiva (SCR) que utiliza el aditivo Ad Blue, inyectándolo dentro del catalizador; la línea azul representa la tendencia que siguen los valores de (NO_x) en antiguos vehículos Scania (Euro III), esta línea tiene pendiente positiva indicando que los valores de emisiones siempre aumentan a medida que se incrementa la altitud. La línea roja representa la tendencia para el mismo parámetro (NO_x) de los nuevos vehículos Scania (Euro IV), que ingresaron a partir del 2015 y que utilizan la tecnología (SCR) con AdBlue, es de destacar que esta línea tiene pendiente negativa, representando la disminución de este contaminante al activarse éste sistema dentro del tubo de escape del vehículo.

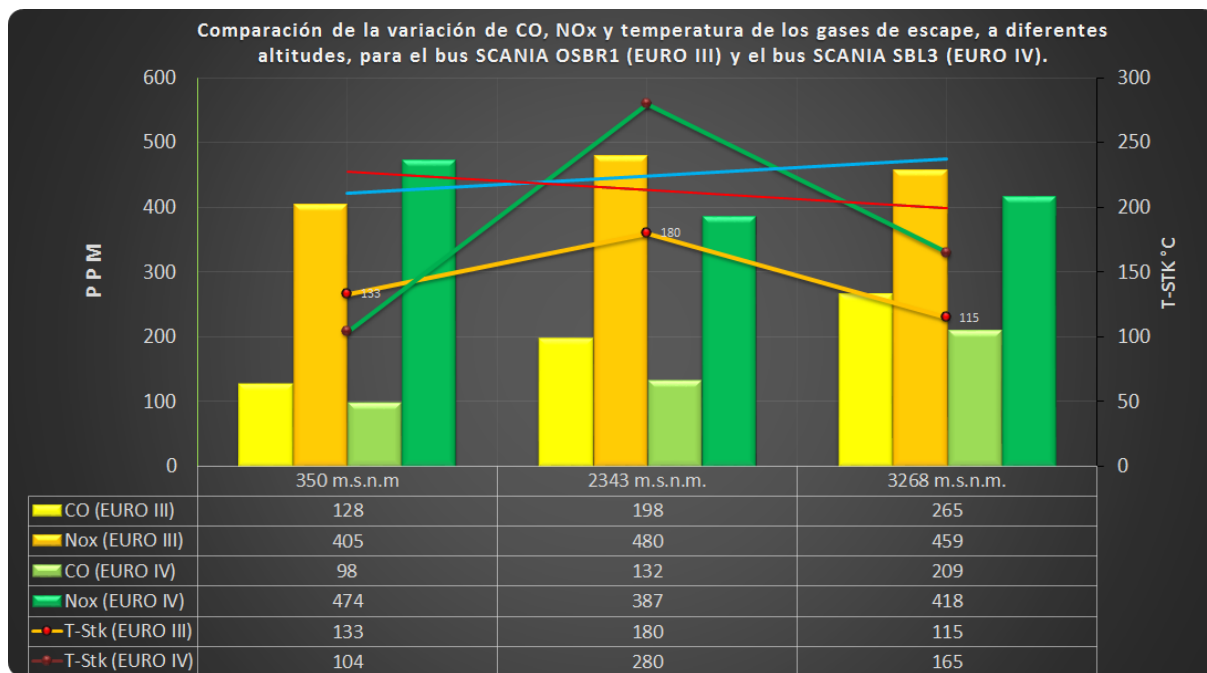


Figura 4-7: Comparativa entre sistemas SCANIA antes y después del decreto 1111 de 2013. Tomado de: El autor.

4.1.5. Valores de contaminantes en motores a gasolina Vs motores diesel medidos

En la Figura 4-8 se ven los resultados de mediciones realizadas a vehículos con motor a gasolina marca Chevrolet, línea LUV modelo 1995, esta medición de gases se realizó a 2609 m.s.n.m en la ciudad de Facatativá.



Figura 4-8: Valores de contaminación, Chevrolet liv. Tomado de: El autor.

Las unidades que en que se miden los parámetros contaminantes cuando se realiza esta prueba los centros de diagnóstico automotor (CDA) es porcentaje (%), con una equivalencia aproximada de 10000 partes por millón (ppm) por cada 1 %,[1], lo que determina que en el caso del monóxido de carbono este vehículo particular con motor a gasolina emite 8700 partes por millón (ppm), valor considerablemente superior a los que se midieron en motores diesel a la altitud de 2343 de la ciudad de Pamplona, los cuales arrojaron valores que estaban por el orden de las 150 partes por millón (ppm).

Cabe aclarar, que las tecnologías respecto a control de emisiones contaminantes de los dos vehículos son completamente diferentes y este análisis se realiza con fines descriptivos y de seguimiento a los cambios que se han dado en parque automotor colombiano, ya que esto puede determinar las futuras políticas respecto al control de emisiones contaminantes.

En la Figura 4-9 se observan los valores de parámetros contaminantes de monóxido de carbono (CO) en porcentaje (%), para un vehículo marca Renault, línea 9, modelo 1994,obteniendo un valor de 21100 partes por millón (ppm), lo que comprueba la teoría y evidencia que es necesario estructurar un sistema integral de gestión de la contaminación.

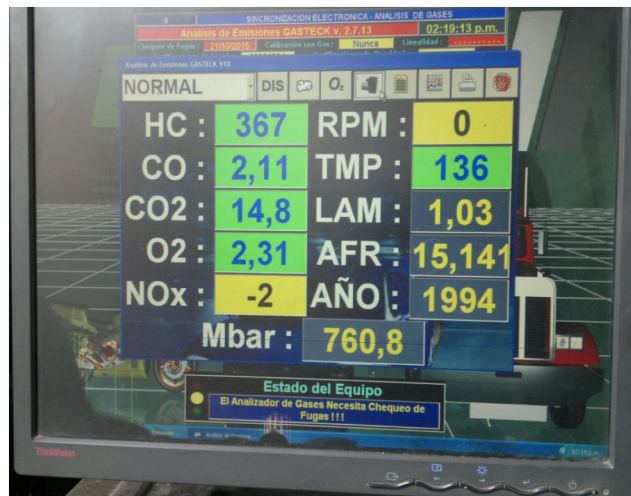


Figura 4-9: Valores de contaminación, Renault 9 . Tomado de: El autor.

4.1.5.1. Posibles repercusiones a futuro

Se prevé que en Colombia para el diseño de políticas medioambientales en el futuro, la reducción de emisiones de material particulado (PM) debe ser una de las prioridades, ya que el ministerio de medio ambiente ha realizado varios estudios en los que se encuentra el material particulado como una de las principales causantes de enfermedades respiratorias. A pesar de la mayor reducción de parámetros contaminantes con la adopción de la normativa Euro IV, en los vehículos Chevrolet que utilizan la tecnología de catalizador oxidativo para vehículos diesel (DOC) se debe hacer un seguimiento a al comportamiento de este tipo de catalizador y respetar los términos de vida útil que dictamine el fabricante, ya que estos sistemas son bastante sensibles a la cantidad de azufre contenida en el combustible diesel, pues durante su funcionamiento presenta taponamiento dentro del catalizador que disminuye su efectividad.

4.2. ANÁLISIS ECONOMÉTRICO.

4.2.0.1. Externalidades

Las externalidades se definen como decisiones de consumo, producción e inversión que toman los individuos, los hogares y las empresas y que afectan a terceros que no participan directamente en esas transacciones; a veces, esos efectos indirectos son minúsculos, pero cuando son grandes, pueden resultar problemáticos, las externalidades son una de las principales razones que llevan a los gobiernos a intervenir en la economía.

Cuando hay externalidades se producen efectos indirectos que repercuten en las oportunidades de consumo y producción de terceros, pero el precio del producto, en este caso el servicio de transporte, no refleja esas externalidades, por ende las rentabilidades y los costes privados son diferentes de los que asume la sociedad en su conjunto.[26]

4.2.0.2. La contaminación como externalidad en este proyecto

El ejemplo típico de externalidad negativa es la contaminación, en este proyecto el contaminador es el transportador, que toma decisiones basadas únicamente en sus costes y beneficios sin tener en cuenta los costes indirectos que recaen en las víctimas de la contaminación, lo que genera una externalidad negativa.

Los costes sociales de la producción, son superiores a los costes privados, para nuestro proyecto la producción es el servicio de transporte prestado por las empresas, y los costos sociales son aquellos que no recaen ni en el productor (transportador) ni en el usuario (pasajero), incluyen tanto el deterioro de la calidad de vida de la población que vive cerca de los corredores viales como el encarecimiento de la atención en salud y la pérdida de oportunidades de producción; aunque el precio que se ponga al carbono, o contaminantes equivalentes, no sea igual al costo real de la contaminación, sí sirve para desincentivar las emisiones, según Neeraj Prasad, gerente de Alianzas y Conocimiento sobre Cambio Climático del Banco Mundial: “Con los precios al carbono, podemos decir, por ejemplo, que la energía producida con carbón es más cara que la energía producida por un panel solar”. Así mismo, según Alvaro Umaña, ex ministro del Medio Ambiente y Energía de Costa Rica en el foro latinoamericano del carbono en Bogotá: “Si no somos capaces de estimar (en dinero) los daños que causa el cambio climático, hay otros mecanismos que podemos usar para determinar los precios que deberíamos usar como indicadores”.

Si bien América Latina no es la región que más contamina, si es muy vulnerable a las alteraciones del clima, como sequías prolongadas, inundaciones y tormentas más fuertes y recurrentes. Por eso, algunos gobiernos de la región ya han establecido varios mecanismos y políticas para desincentivar las emisiones.

Un ejemplo es el impuesto al carbono, que aplica a las emisiones de dióxido de carbono, y varían según cada país. En México un nuevo impuesto a combustibles fósiles está ligado al contenido de carbono en el producto: por ejemplo, es más alto para el diésel 12.40 centavos por litro que para la gasolina que es 10.38 centavos por litro.

Según un estudio realizado por el ministerio de medio ambiente en el año 2004 la contaminación del aire externo a nuestros hogares cuesta al país 1.5 billones de pesos anualmente [6] y de esa cifra, aproximadamente la mitad es causada por las distintas formas de trans-

porte. En otro estudio realizado por el ministerio de medio ambiente en el año 2012 [2] se determinó que la calidad del aire en buena parte del país estaba empeorando por cuenta del material particulado PM emitido principalmente por los motores diesel, debido a la mayor cantidad de carbono en la composición de este combustible,[7].

En la Figura 4-10 se puede ver los efectos de la contaminación ambiental externa, cuantificados como mortalidad por causas cardiopulmonares y morbilidad respiratoria.

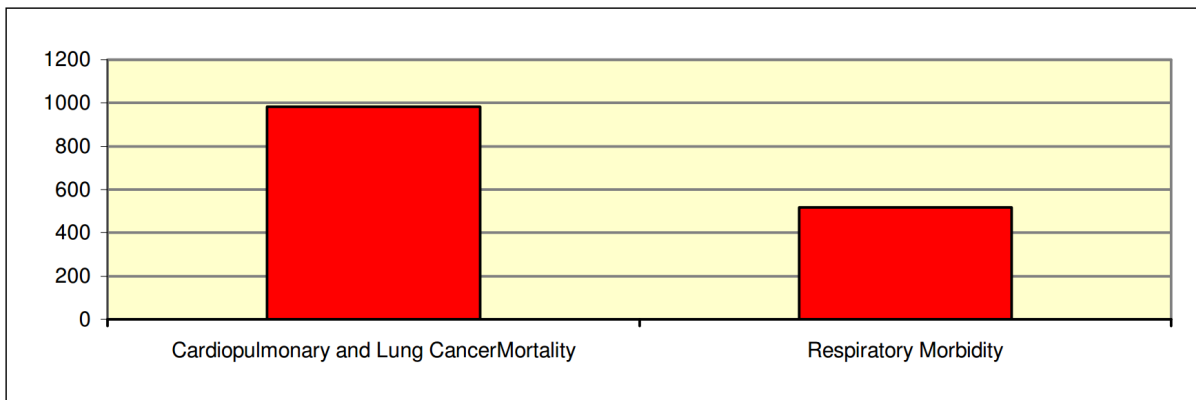


Figura 4-10: Morbilidad y mortalidad causada por la contaminación ambiental en Colombia. Tomado de:[6].

Con el fin de realizar el análisis de los datos y la estimación de la ecuación se utilizó el software econométrico EVIEWS 2008, donde la variable dependiente es la emisión de monóxido de carbono (CO) a las tres diferentes altitudes en que se realizaron las mediciones y como variables dependientes e intervinientes, la altitud y la temperatura de los gases de escape del vehículo analizado, respectivamente.

Este análisis econométrico se realizó para los trece buses Scania que cumplen la normativa Euro IV ya que son los que presentan mayores niveles de emisiones.

En la Figura 4-11 se observa la interfaz de trabajo del software EVIEWS versión 8, donde se registran las variables altitud como X1, temperatura de los gases de escape como X2 y el valor de monóxido de carbono (CO) en partes por millón (ppm). En esta interfaz se puede observar el análisis y funciones calculadas.

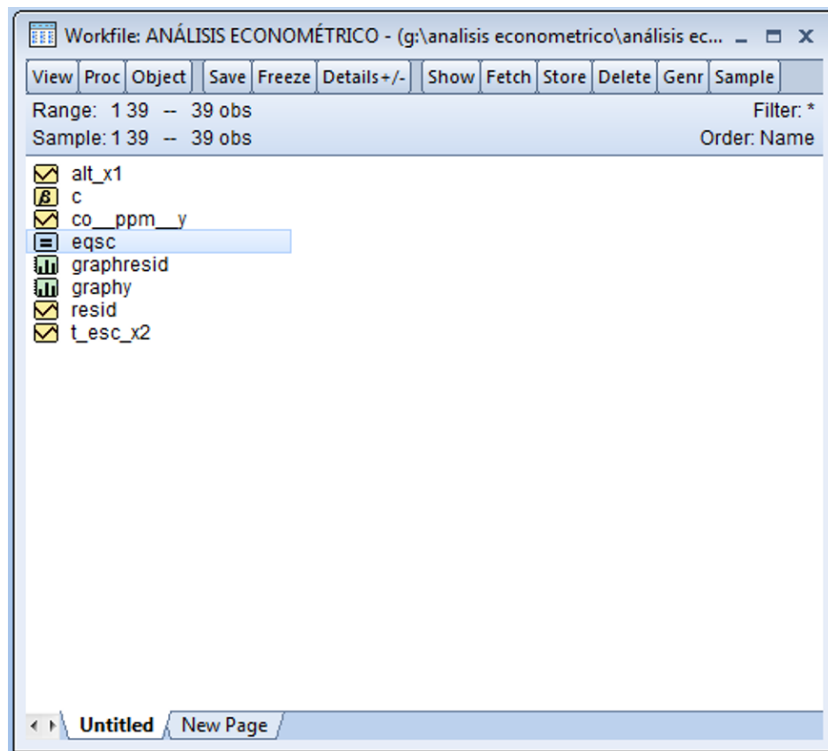


Figura 4-11: Interfaz de trabajo del software EViews versión 8. Tomado de: El autor.

En la Figura 4-12 se observa estimación de la ecuación para los valores de monóxido de carbono en función de la altitud y la temperatura de los gases de escape.

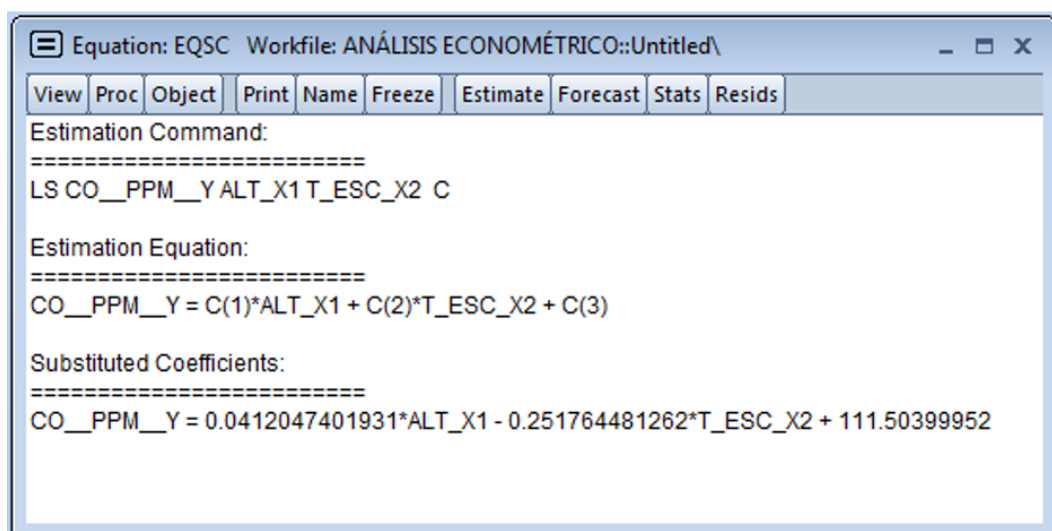


Figura 4-12: Estimación de la ecuación para los valores de monóxido de carbono en función del de la altitud y la temperatura los gases de escape. Tomado de: El autor.

En la Figura 4-13 se muestra el análisis de residuos utilizando caja de bigotes y se observa que se encuentran bastante cerca al cero, lo que da suficiente evidencia estadística para hacer válido el análisis.

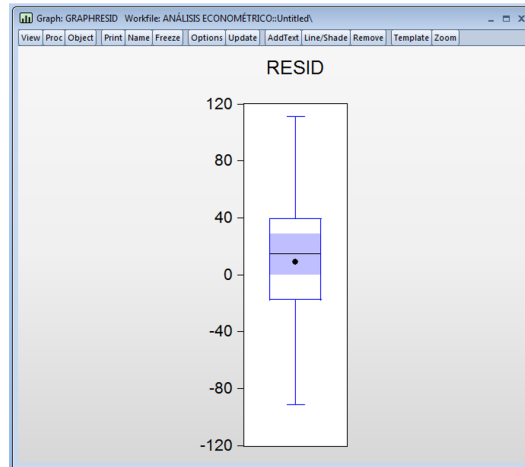


Figura 4-13: Análisis de residuos utilizando caja de bigotes. Tomado de: El autor.

En la Figura 4-14 se ven los resultados calculados por el software EViews donde se presentan las dos variables independientes con sus respectivos coeficientes. También se destaca el valor de R-squared que indica cuánto de la variable dependiente (partes por millón de monóxido de carbono (CO)), es causado por las dos variables independientes (altitud (m.s.n.m.) y la temperatura de los gases de escape (grados Celsius)).

Para este caso las emisiones de monóxido de carbono (CO) son explicadas en un 66% por las dos variables restantes, altitud como variable independiente y temperatura de los gases de escape como variable interviniente.

Este porcentaje de explicación es bastante alto, teniendo en cuenta la gran cantidad de factores difíciles y en algunos casos imposibles de cuantificar, que pueden afectar la apropiada combustión de un motor diesel, algunos de estos pueden ser: nivel de suciedad en filtros de aire, aceite y combustible, formas de manejo inadecuadas, presión incorrecta en las líneas de combustible, nivel bajo de refrigerante del motor, entre muchas más.

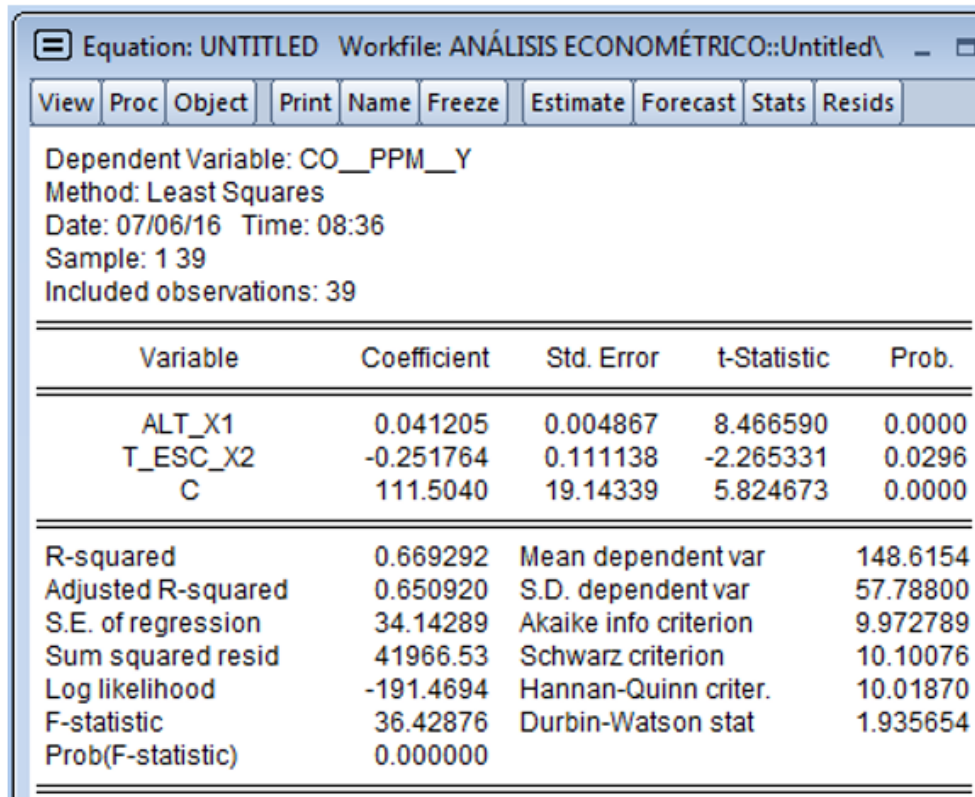


Figura 4-14: Resultados calculados por el software EViews. Tomado de: El autor.

En la Figura 4-15 se ve el análisis de los residuos generado utilizando histograma de residuos y se destaca la simetría que indica validez de la muestra tomada.

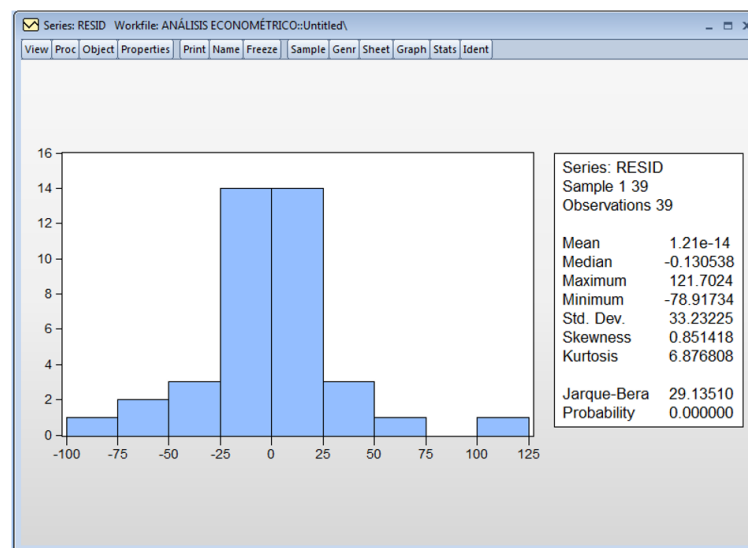


Figura 4-15: Histograma de residuos. Tomado de: El autor.

En la Figura 4-16 se ve la gráfica generada por un software online, representada por un área plana y con valores para la altitud entre 0 y 5000, mientras que para la temperatura de los gases de escape se tomaron valores entre 0 grados Celsius y 300 Celsius; buscando de esta forma ampliar el rango de las variables y las diferentes combinaciones que se pueden dar en nuestro país, como funcionamiento de los motores en mayores altitudes

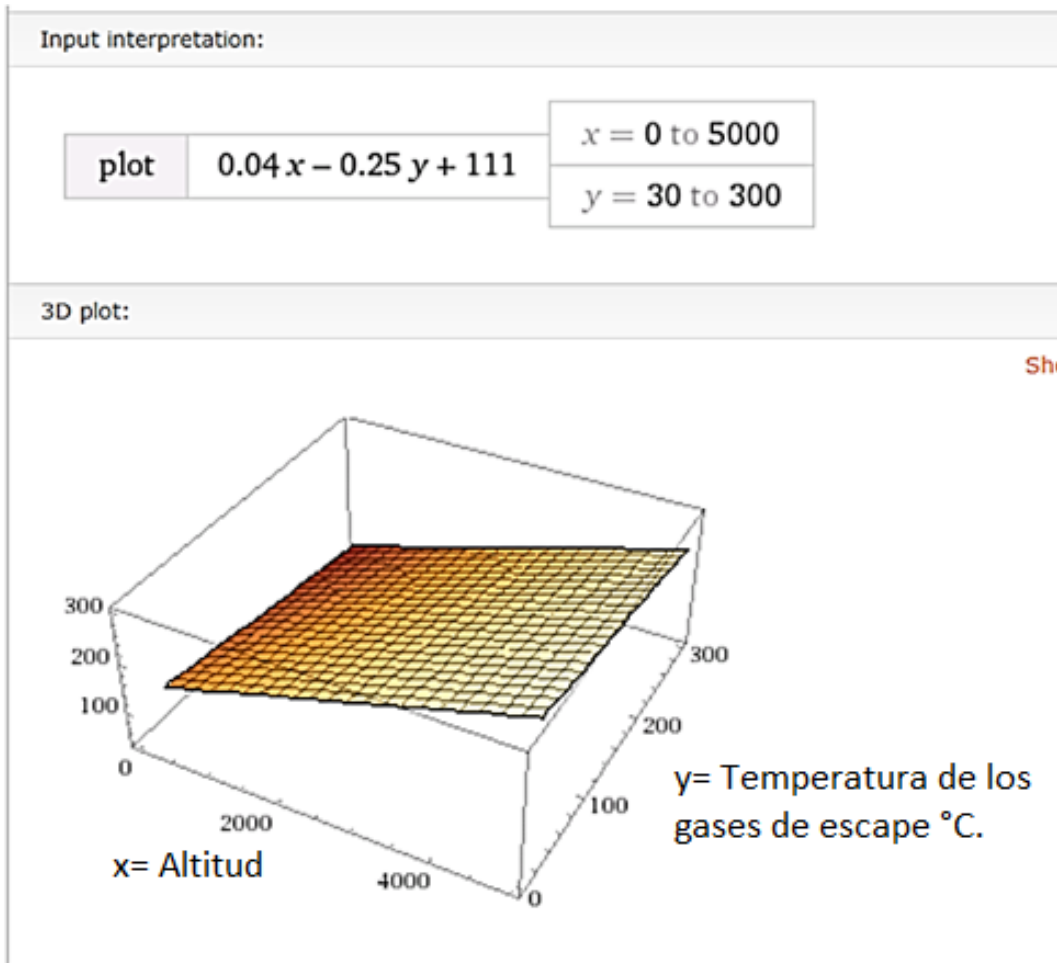


Figura 4-16: Gráfica generada con la ecuación calculada. Tomado de: El autor.

Capítulo 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

1. Se logró cuantificar las emisiones de contaminantes de motores diesel en transporte pesado de pasajeros que cumplen con la norma Euro IV (Modelos 2015 y posteriores), tomando en cuenta la altitud como variable independiente y la temperatura de los gases de escape como variable interviniente.
2. Los niveles de monóxido de carbono (CO) aumentan a medida que se incrementa la altitud.
3. El sistema de reducción con catálisis selectiva (SCR) con adición de urea diluida al 32 % (AdBlue) utilizado por la marca Scania, si disminuye los valores de óxido de nitrógeno (NOx) emitidos por motores diesel funcionando en nuestro país.
4. El sistema de catalizador oxidativo para motores diesel (DOC), operando en las condiciones topográficas colombianas, disminuye el contaminante monóxido de carbono (CO) en mayor medida que el sistema de reducción con catálisis selectiva (SCR).
5. Las medidas implementadas para disminuir los niveles de contaminación en Colombia, efectivamente han mejorado la calidad del aire, disminuyendo las emisiones de fuentes móviles.
6. El análisis de gases en ralentí resultó ser un método efectivo para cuantificar las emisiones contaminantes, parámetro a parámetro de motores diesel funcionando en Colombia, específicamente desde Pamplona por la ruta 66 hasta el páramo y desde Pamplona por la ruta 55 hasta Cúcuta.
7. La medición de la opacidad en los humos generados por motores diesel, muestra parcialmente el nivel de contaminación, ya que solamente mide el porcentaje de luz que no logra atravesar la columna de humo emitida por el exosto del vehículo, sin

78 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

medir parámetros tan importantes, como el monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NOx) y óxidos de azufre (SO).

8. La masificación en el uso del combustible diesel en Colombia ha generado graves problemas en la población, como infecciones respiratorias, problemas cardiovasculares y pérdida de jornadas laborales, entre otros.
9. La disminución de la cantidad de azufre contenida en el combustible diesel, ha permitido que nuevas tecnologías para el control de emisiones contaminantes de motores diesel ingresen al país y de esta manera reducir los niveles de contaminación generados.
10. Colombia por sus condiciones geográficas y la dudosa calidad del combustible, presenta un reto para la operación de motores diesel, ya que los sistemas de control sobre la inyección no logran adaptarse a los cambios bruscos de altitud.
11. La entrada en vigencia de la resolución 1111 de 2013 generó una disminución considerable en los niveles de emisiones contaminantes (CO y NOx), por la obligada renovación del parque automotor y por ende de la implementación del uso de nuevas tecnologías para el control de emisiones contaminantes. item Con la considerable reducción también se observa que a pesar de que los vehículos Scania cumplen con la normativa Euro IV sus niveles de contaminación son más elevados que los vehículos Chevrolet LV 150.
12. Cuando se realizan análisis de gases a motores, se debe monitorear la temperatura de trabajo, pues es un parámetro determinante para la calidad de la combustión.
13. El análisis econométrico es una herramienta que permite predecir el comportamiento de variables tan complejas como la contaminación ambiental, y se puede utilizar para el diseño de políticas públicas que reduzcan los niveles de contaminación ambiental.
14. Con la adopción de la normativa Euro IV por parte de nuestro país, a partir de 2015, Colombia se actualizó en materia de normativa, siguiendo los pasos de America Latina.
15. La implementación de tecnologías que reducen el nivel de contaminantes emitidos por fuentes móviles no debe ser visto como un gasto, sino como una inversión para la reducción de costos sociales, que a la larga aumentará la rentabilidad de los transportadores y mejorará la calidad de vida de la mayoría de la población.
16. Los sistemas modernos para el control de emisiones contaminantes requieren de una mejora en la calidad del combustible ofertado, para que su rendimiento y vida útil no se vean reducidos.

17. Nuevas tecnologías para la reducción de contaminantes en fuentes móviles, también requieren diferentes sistemas de medición para su control.

5.2. RECOMENDACIONES

- Debido a las condiciones topográficas, sociales y económicas de nuestro país se recomienda que los análisis de gases realizados a los motores diesel se hagan de forma más específica midiendo por lo menos, monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NOx), hidrocarburos (HC), y material particulado (PM)[18].
- Es necesario hacer un seguimiento al combustible diesel utilizado en nuestro país, ya que no es homogéneo para todas las regiones y las diferencias presentadas influyen sobre el nivel de emisiones contaminantes.
- Se debe realizar constante socialización de los diferentes sistemas para control de emisiones contaminantes para que la decisión de que sistema utilizar no sea tomada unilateralmente por los comerciantes de vehículos con motores diesel; de esta manera el mercado se diversificará con más tecnologías.

Anexo A

Tablas de cada vehículo medido

A.1. SCANIA EURO IV

A.1.1. Bus código SBL1

Tabla A-1: Bus SBL1

Empresa:BERLINAS 8025	Placa: WFI393	Marca: SCANIA K410	Modelo: 2015	
Variables medidas	Altitud (m.s.n.m.)			CÓDIGO
Fecha: 24/04/16	350	2343	3268	SBL1
Hora:	14:03	16:46	18:20	
O2 (%)	12			
CO (ppm)	100	129	206	
Eff (%)	87,7			
CO2 (%)	6,7			
T-Stk °C	107	273	159	
T-Air °C	23,7	26,9	23,2	
EA (%)	124			
CO(0) (ppm)	249			
NO (ppm)	451	369	398	
NOx (ppm)	474	388	418	
SO2 (ppm)	0	0		
NO(0) (ppm)	1167			

A.1.2. Bus código SBO1

Tabla A-2: Bus SBO1

Empresa: BOLIVARIANO	Placa: WFI659	Marca: SCANIA K360	Modelo: 2016	
Variables medidas	Altitud (m.s.n.m.)			CÓDIGO
Fecha: 24/04/16	350	2343	3268	SBO1
Hora:	14:06	16:38	18:56	
O ₂ (%)				
CO (ppm)	109	115	242	
Eff (%)				
CO ₂ (%)				
T-Stk °C	132	260	124	
T-Air °C	29,6	23,4	15,9	
EA (%)				
CO(0) (ppm)				
NO (ppm)	395	370	358	
NO _x (ppm)	415	389	376	
SO ₂ (ppm)		0		
NO(0) (ppm)				

A.1.3. Bus código SBL2

Tabla A-3: Bus SBL2

Empresa: BERLINAS 8022	Placa: WNR088	Marca: SCANIA K360	Modelo: 2016	
Variables medidas	Altitud (m.s.n.m.)			CÓDIGO
Fecha: 07/05/16	350	2343	3268	SBL2
Hora:	12:49	10:37	9:16	
O ₂ (%)				
CO (ppm)	102	118	251	
Eff (%)				
CO ₂ (%)				
T-Stk °C	170	158	168	
T-Air °C	31,3	18,2	16	
EA (%)				
CO(0) (ppm)				
NO (ppm)	384	341	325	
NO _x (ppm)	403	358	341	
SO ₂ (ppm)		0		
NO(0) (ppm)				

A.1.4. Bus código SBO2

Tabla A-4: Bus SBO2

Empresa: BOLIVARIANO 11332	Placa: WFH733	Marca: SCANIA K360	Modelo: 2015	
Variables medidas	Altitud (m.s.n.m.)			CÓDIGO
Fecha: 24/04/16	350	2343	3268	SBO2
Hora:	14:07	16:58	19:18	
O ₂ (%)	12,7			
CO (ppm)	79	75	129	
Eff (%)	96,3			
CO ₂ (%)	6,1			
T-Stk °C	123	215	192	
T-Air °C	26,9	25,8	15,7	
EA (%)	142,5			
CO(0) (ppm)	194			
NO (ppm)	321	498	477	
NO _x (ppm)	337	523	501	
SO ₂ (ppm)				
NO(0) (ppm)	793			

A.1.5. Bus código SBL3

Tabla A-5: Bus SBL3

Empresa: BERLINAS 8025	Placa: WFI393	Marca: SCANIA K410	Modelo: 2015	
Variables medidas	Altitud (m.s.n.m.)			CÓDIGO
Fecha: 08/05/16	350	2343	3268	SBL3
Hora:	11:50	8:40	7:27	
O ₂ (%)	13			
CO (ppm)	98	132	209	
Eff (%)	87,6			
CO ₂ (%)	6,4			
T-Stk °C	104	280	165	
T-Air °C	23,5	26,8	23,4	
EA (%)	125			
CO(0) (ppm)	249			
NO (ppm)	451	369	398	
NO _x (ppm)	474	387	418	
SO ₂ (ppm)	0	0		
NO(0) (ppm)	1169			

A.1.6. Bus código SCO1

Tabla A-6: Bus SCO1

Empresa: COPETTRAN 8222	Placa: TTW 361	Marca: SCANIA K360	Modelo: 2017	
Variables medidas	Altitud (m.s.n.m.)			CÓDIGO
Fecha: 08/05/16	350	2343	3268	
Hora:	11:40	9:01	8:00	SCO1
O2 (%)				
CO (ppm)	125	161	316	
Eff (%)				
CO2 (%)				
T-Stk °C	238	224	206	
T-Air °C	28,7	17,6	15,3	
EA (%)				
CO(0) (ppm)				
NO (ppm)	385	354	380	
NOx (ppm)	404	372	399	
SO2 (ppm)		0		
NO(0) (ppm)				

A.1.7. Bus código SBL4

Tabla A-7: Bus SBL4

Empresa: Berlinas 8017	Placa: WGP669	Marca: SCANIA K360	Modelo: 2016	
Variables medidas	Altitud (m.s.n.m.)			CÓDIGO
Fecha: 08/05/16	350	2343	3268	
Hora:	14:01	16:35	18:53	SBL4
O2 (%)	17,4			
CO (ppm)	85	143	207	
Eff (%)				
CO2 (%)				
T-Stk C	130	221	164	
T-Air C	35,9	22,6	18,4	
EA (%)				
CO(0) (ppm)				
NO (ppm)	393	546	415	
NOx (ppm)	413	573	436	
SO2 (ppm)				
NO(0) (ppm)				

A.1.8. Bus código SBO3

Tabla A-8: Bus SBO3

Empresa: BOLIVARIANO 11327	Placa: WFG844	Marca: SCANIA K410	Modelo: 2016	
Variables medidas	Altitud (m.s.n.m.)			CÓDIGO
Fecha: 08/05/16	350	2343	3268	SBO3
Hora:	14:08	16:39	19:03	
O2 (%)	17,7			
CO (ppm)	93	156	213	
Eff (%)				
CO2 (%)				
T-Stk °C	135	223	185	
T-Air °C	38,1	17,5	14,9	
EA (%)				
CO(0) (ppm)				
NO (ppm)	294	385	396	
NOx (ppm)	309	404	416	
SO2 (ppm)				
NO(0) (ppm)				

A.1.9. Bus código SBL5

Tabla A-9: Bus SBL5

Empresa: BERLINAS 8023	Placa: WNL087	Marca: SCANIA K360	Modelo: 2016	
Variables medidas	Altitud (m.s.n.m.)			CÓDIGO
Fecha: 16/05/16	350	2343	3268	SBL5
Hora:	11:19	16:50	18:45	
O2 (%)				
CO (ppm)	147	157	192	
Eff (%)				
CO2 (%)				
T-Stk °C	76	231	147	
T-Air °C	34,1	23,6	16,3	
EA (%)				
CO(0) (ppm)				
NO (ppm)	270	345	391	
NOx (ppm)	284	362	411	
SO2 (ppm)		0		
NO(0) (ppm)				

A.1.10. Bus código SBL6

Tabla A-10: Bus SBL6

Empresa: BERLINAS 8022	Placa: WNR088	Marca: SCANIA K360	Modelo: 2016	
Variables medidas	Altitud (m.s.n.m.)			CÓDIGO
Fecha: 16/05/16	350	2343	3268	SBL6
Hora:	11:40	16:53	18:06	
O ₂ (%)				
CO (ppm)	90	144	200	
Eff (%)				
CO ₂ (%)				
T-Stk °C	79	268	158	
T-Air °C	36,4	25,8	17,2	
EA (%)				
CO(0) (ppm)				
NO (ppm)	307	352	409	
NO _x (ppm)	322	370	429	
SO ₂ (ppm)		0		
NO(0) (ppm)				

A.1.11. Bus código SBL7

Tabla A-11: Bus SBL7

Empresa: BERLINAS 8024	Placa: WGQ419	Marca: SCANIA K360	Modelo: 2015	
Variables medidas	Altitud (m.s.n.m.)			CÓDIGO
Fecha: 16/05/16	350	2343	3268	SBL7
Hora:	11:56	16:32	18:53	
O ₂ (%)				
CO (ppm)	66	139	207	
Eff (%)				
CO ₂ (%)				
T-Stk °C	104	263	164	
T-Air °C	41,4	22,9	18,4	
EA (%)				
CO(0) (ppm)				
NO (ppm)	262	325	337	
NO _x (ppm)	275	341	354	
SO ₂ (ppm)		0		
NO(0) (ppm)				

A.1.12. Bus código SBL8

Tabla A-12: Bus SBL8

Empresa: BERLINAS 8014	Placa: WLN064	Marca: SCANIA K410	Modelo: 2015	
Variables medidas	Altitud (m.s.n.m.)			CÓDIGO
Fecha: 16/05/16	350	2343	3268	SBL8
Hora:	16:26	18:52	20:08	
O ₂ (%)				
CO (ppm)	50	149	193	
Eff (%)				
CO ₂ (%)				
T-Stk °C	182	205	174	
T-Air °C	30,7	25,9	14,2	
EA (%)				
CO(0) (ppm)				
NO (ppm)	249	372	391	
NO _x (ppm)	261	391	411	
SO ₂ (ppm)				
NO(0) (ppm)				

A.1.13. Bus código SCO2

Tabla A-13: Bus SCO2

Empresa: COPETTRAN 8192	Placa: TTW232	Marca: SCANIA K360	Modelo: 2016	
Variables medidas	Altitud (m.s.n.m.)			CÓDIGO
Fecha: 29/05/16	350	2343	3268	SCO2
Hora:	16:57	19:06	20:26	
O ₂ (%)				
CO (ppm)	104	162	203	
Eff (%)				
CO ₂ (%)				
T-Stk °C	167	215	145	
T-Air °C	34,1	22,9	13,7	
EA (%)				
CO(0) (ppm)				
NO (ppm)	331	339	382	
NO _x (ppm)	348	356	401	
SO ₂ (ppm)		0		
NO(0) (ppm)				

A.2. CHEVROLET EURO IV

A.2.1. Bus código CBL1

Tabla A-14: Bus CBL1

Empresa:BERLINAS 8020	Placa: WF1242	Marca: CHEVROLET LV 152	Modelo: 2015	
Variables medidas	Altitud (m.s.n.m.)			CÓDIGO
Fecha: 07/05/16	350	2343	3268	CBL1
Hora:	14:00	16:30	18:15	
O ₂ (%)	18,2			
CO (ppm)	31	95	170	
Eff (%)				
CO ₂ (%)				
T-Stk °C	105	156	125	
T-Air °C	33	20,7	14,6	
EA (%)				
CO(0) (ppm)				
NO (ppm)	168	155	149	
NO _x (ppm)	176	163	157	
SO ₂ (ppm)				
NO(0) (ppm)				

A.2.2. Bus código CBR1

Tabla A-15: Bus CBR1

Empresa:BRASILIA 6681	Placa: WLE996	Marca: CHEVROLET LV 452	Modelo: 2016	
Variables medidas	Altitud (m.s.n.m.)			CÓDIGO
Fecha: 08/05/16	350	2343	3268	CBR1
Hora:	11:50	9:12	8:03	
O ₂ (%)				
CO (ppm)	22	98	168	
Eff (%)				
CO ₂ (%)				
T-Stk °C	173	140	109	
T-Air °C	35,5	20,7	15,7	
EA (%)				
CO(0) (ppm)				
NO (ppm)	185	140	143	
NO _x (ppm)	195	147	150	
SO ₂ (ppm)				
NO(0) (ppm)				

A.2.3. Bus código CBR2

Tabla A-16: Bus CBR2

Empresa:BRASILIA 6688	Placa: WLE958	Marca: CHEVROLET LV 452	Modelo: 2016	
Variables medidas	Altitud (m.s.n.m.)			CÓDIGO
Fecha: 08/05/16	350	2343	3268	CBR2
Hora:	14:05	16:22	19:04	
O2 (%)				
CO (ppm)	45	158	169	
Eff (%)				
CO2 (%)				
T-Stk °C	160	152	112	
T-Air °C	28	16,2	15	
EA (%)				
CO(0) (ppm)				
NO (ppm)	180	164	144	
NOx (ppm)	189	172	151	
SO2 (ppm)				
NO(0) (ppm)				

A.2.4. Bus código CBL2

Tabla A-17: Bus CBL2

Empresa:BERLINAS 8018	Placa: WLN286	Marca: CHEVROLET LV 452	Modelo: 2016	
Variables medidas	Altitud (m.s.n.m.)			CÓDIGO
Fecha: 09/05/16	350	2343	3268	CBL2
Hora:	14:16	16:23	18:46	
O2 (%)				
CO (ppm)	85	72	182	
Eff (%)				
CO2 (%)				
T-Stk °C	84	144	125	
T-Air °C	29,7	19,2	15,4	
EA (%)				
CO(0) (ppm)				
NO (ppm)	88	178	158	
NOx (ppm)	93	187	166	
SO2 (ppm)				
NO(0) (ppm)				

A.2.5. Bus código CBL3

Tabla A-18: Bus CBL3

Empresa:BERLINAS 8018	Placa: WLN286	Marca: CHEVROLET LV 452	Modelo: 2016	
Variables medidas	Altitud (m.s.n.m.)			CÓDIGO
Fecha: 16/05/16	350	2343	3268	
Hora:	11:12	17:10	19:28	CBL3
O2 (%)				
CO (ppm)	80	92	196	
Eff (%)				
CO2 (%)				
T-Stk °C	87	142	138	
T-Air °C	31,6	28	15,4	
EA (%)				
CO(0) (ppm)				
NO (ppm)	84	139	176	
NOx (ppm)	88	146	185	
SO2 (ppm)				
NO(0) (ppm)				

A.2.6. Bus código CBL4

Tabla A-19: Bus CBL1

Empresa:BERLINAS 8026	Placa: WLN286	Marca: CHEVROLET LV 452	Modelo: 2016	
Variables medidas	Altitud (m.s.n.m.)			CÓDIGO
Fecha: 16/05/16	350	2343	3268	
Hora:	13:54	16:41	19:13	CBL4
O2 (%)				
CO (ppm)	66	102	174	
Eff (%)				
CO2 (%)				
T-Stk °C	104	169	153	
T-Air °C	33,5	21,6	15,9	
EA (%)				
CO(0) (ppm)				
NO (ppm)	147	145	153	
NOx (ppm)	155	152	161	
SO2 (ppm)				
NO(0) (ppm)				

A.3. OTROS CHEVROLET LV 150 (EURO II), SCANIA K310 (EURO III), VOLVO B420R

A.3.1. Bus código OCCO1

Tabla A-20: Bus OCCO1

Empresa: COPETTRAN	Placa: XVX531	Marca: CHEVROLET LV 452		Modelo: 2016
Variables medidas	Altitud (m.s.n.m.)			CÓDIGO
Fecha: 16/05/16	350	2343	3268	
Hora:	13:50	12:02	10:33	OCCO1
O ₂ (%)	13			
CO (ppm)	87	204	308	
Eff (%)	85,3			
CO ₂ (%)	5			
T-Stk C	118	116	80	
T-Air C	28	18,2	17,9	
EA (%)	175,3			
CO(0) (ppm)	220			
NO (ppm)	348	382	452	
NO _x (ppm)	365	401	475	
SO ₂ (ppm)				
NO(0) (ppm)				

A.3.2. Bus código OCCO2

Tabla A-21: Bus OCCO2

Empresa: COPETTRAN 7566	Placa: XVU459	Marca: CHEVROLET LV 452		Modelo: 2010
Variables medidas	Altitud (m.s.n.m.)			CÓDIGO
Fecha: 24/04/16	350	2343	3268	
Hora:	14:11	16:50	19:25	OCCO2
O ₂ (%)	13,8			
CO (ppm)	82	208	315	
Eff (%)	85,5			
CO ₂ (%)	5,3			
T-Stk C	121	118	90	
T-Air C	29,1	19,3	16,2	
EA (%)	179,4			
CO(0) (ppm)	238			
NO (ppm)	351	391	459	
NO _x (ppm)	368	410	482	
SO ₂ (ppm)				
NO(0) (ppm)				

A.3.3. Bus código OSBR1

Tabla A-22: Bus OSBR1

Empresa:BRASILIA 6650	Placa: STS996	Marca: SCANIA K310 EURO III		Modelo: 2014
Variables medidas	Altitud (m.s.n.m.)			CÓDIGO
Fecha: 07/05/16	350	2343	3268	
Hora:	14:05	16:50	17:13	OSBR1
O ₂ (%)	18,3			
CO (ppm)	128	198	265	
Eff (%)				
CO ₂ (%)				
T-Stk C	133	180	115	
T-Air C	35,6	22,1	14,8	
EA (%)				
CO(0) (ppm)				
NO (ppm)	386	457	437	
NO _x (ppm)	405	480	459	
SO ₂ (ppm)				
NO(0) (ppm)				

A.3.4. Bus código OVOM1

Tabla A-23: Bus OVOM1

Empresa:OMEGA 8826	Placa: WFI561	Marca: VOLVO B 420R		Modelo: 2015
Variables medidas	Altitud (m.s.n.m.)			CÓDIGO
Fecha: 07/05/16	350	2343	3268	
Hora:	14:13	17:06	18:42	OVOM1
O ₂ (%)	20,1	2,2		
CO (ppm)	62	120	214	
Eff (%)		84,9		
CO ₂ (%)		14		
T-Stk C	141	258	187	
T-Air C	36,6	25,2	15,1	
EA (%)		10,8		
CO(0) (ppm)				
NO (ppm)	303	204	337	
NO _x (ppm)	318	214	354	
SO ₂ (ppm)				
NO(0) (ppm)		228		

A.3.5. Bus código OSCO2

Tabla A-24: Bus OSCO2

Empresa: COPETTRAN 7676	Placa: SUE462	Marca: SCANIA K310 III	Modelo: 2008	
Variables medidas	Altitud (m.s.n.m.)			CÓDIGO
Fecha: 08/05/16	350	2343	3268	OSCO2
Hora:	11:40	8:45	7:13	
O2 (%)	18			
CO (ppm)	125	164	250	
Eff (%)				
CO2 (%)				
T-Stk C	140	162	93	
T-Air C	26,9	19,4	15,2	
EA (%)				
CO(0) (ppm)				
NO (ppm)	382	436	440	
NOx (ppm)	401	458	462	
SO2 (ppm)				
NO(0) (ppm)				

A.3.6. Bus código OCBL3

Tabla A-25: Bus OCBL3

Empresa: BERLINAS 7008	Placa: SOS399	Marca: CHEVROLET LV 150	Modelo: 2015	
Variables medidas	Altitud (m.s.n.m.)			CÓDIGO
Fecha: 08/05/16	350	2343	3268	OCBL3
Hora:	14:14	16:40	18:52	
O2 (%)	18,6			
CO (ppm)	79	210	326	
Eff (%)				
CO2 (%)				
T-Stk C	167	165	105	
T-Air C	38,6	18,9	16,4	
EA (%)				
CO(0) (ppm)				
NO (ppm)	242	378	467	
NOx (ppm)	254	397	490	
SO2 (ppm)				
NO(0) (ppm)				

A.3.7. Bus código OCOM4

Tabla A-26: Bus OCOM4

Empresa:OMEGA 8629	Placa: TTU501	Marca: CHEVROLET LV 150	Modelo: 2013	
Variables medidas	Altitud (m.s.n.m.)			CÓDIGO
Fecha: 13/05/16	350	2343	3268	OCOM4
Hora:	12:54	11:10	9:46	
O2 (%)	18		12	
CO (ppm)	92	209	300	
Eff (%)			87,1	
CO2 (%)			6,7	
T-Stk C	170	167	105	
T-Air C	35	17,4	13,5	
EA (%)			123,7	
CO(0) (ppm)			701	
NO (ppm)	245	364	426	
NOx (ppm)	258	382	447	
SO2 (ppm)				
NO(0) (ppm)			995	

A.3.8. Bus código OCBL5

Tabla A-27: Bus OCBL5

Empresa:BERLINAS 7008	Placa: SOS399	Marca: CHEVROLET LV 150	Modelo: 2015	
Variables medidas	Altitud (m.s.n.m.)			CÓDIGO
Fecha: 08/05/16	350	2343	3268	OCBL5
Hora:	14:14	16:03	19:22	
O2 (%)	18,6			
CO (ppm)	79	195	341	
Eff (%)				
CO2 (%)				
T-Stk C	167	175	108	
T-Air C	38,6	19,6	15,2	
EA (%)				
CO(0) (ppm)				
NO (ppm)	242	386	472	
NOx (ppm)	254	405	496	
SO2 (ppm)				
NO(0) (ppm)				

A.3.9. Bus código OCCO6

Tabla A-28: Bus OCCO6

Empresa: COPETRAN 8066	Placa: TTR451	Marca: CHEVROLET LV 150	Modelo: 2008	
Variables medidas	Altitud (m.s.n.m.)			CÓDIGO
Fecha: 16/05/16	350	2343	3268	
Hora:	14:15	16:07	19:15	OCCO6
O ₂ (%)				
CO (ppm)	52	203	350	
Eff (%)				
CO ₂ (%)				
T-Stk C	140	185	102	
T-Air C	37,5	19,1	14,4	
EA (%)				
CO(0) (ppm)				
NO (ppm)	533	397	461	
NO _x (ppm)	560	417	484	
SO ₂ (ppm)				
NO(0) (ppm)				

Bibliografía

- [1] ACADEMIA: (2015)
- [2] AMBIENTE, MINISTERIO DE M.: DIAGNOSTICO NACIONAL DE SALUD AMBIENTAL. (2012)
- [3] AMBIENTE, VIVIENDA MINISTERIO D.: Resolución 910 de 2008. (2008)
- [4] ARANGO, Jorge H.: Calidad de los combustibles en Colombia. (2009)
- [5] BACHARACH: *PCA3- User manual*, 08 2014
- [6] BJORN, Larsen: Cuanto cuesta la contaminación en Colombia. En: <http://www.bvsde.paho.org/textcom/cd050996/larsen.pdf> (2004)
- [7] BVSDE: Costo Beneficio.
- [8] CATALÁN, Helio: Motores: Evolución moderna.
- [9] CHEVROLET.COM.CO: Características LV 152. (2015)
- [10] DARGHAN, A.: *Métodos estadísticos para ingeniería Mecánica*. 2013
- [11] ECOPETROL: Informe caracterización de combustibles en Colombi. (2013)
- [12] GEOLOGIA: Andes colombianos. (2013)
- [13] GONZÁLEZ, Natalia Elizabeth F.: *ASPECTOS DE LA MEDICIÓN DINÁMICA INSTANTANEA DE EMISIONES DE MOTORES. APLICACIÓN AL DESARROLLO DE UN EQUIPO PORTÁTIL Y UNA METODOLOGÍA PARA ESTUDIOS DE CONTAMINACIÓN DE VEHÍCULOS EN TRÁFICO REAL*. 2012
- [14] GREENACTION: PROYECTO DE CAPACITACIÓN SOBRE DIESEL Y EMISIONES. 2013. – Informe de Investigación

- [15] GUERRA, GERMÁN SAAVEDRA CALIXTO OSCAR C.: EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL GENERADO POR LA EMISIÓN DE GASES EN MOTORES QUE UTILIZAN COMPLEMENTOS LUBRICANTES, EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ D.C. (2013)
- [16] HERNÁNDEZ, Juan Carlos C.: Infección respiratoria aguda en relación con la contaminación atmosférica y otros factores ambientales. (2009)
- [17] ICONTEC. *NORMA TÉCNICA NTC 4231*. 2002
- [18] ICONTEC: *NORMA TÉCNICA NTC 5375*. (2010)
- [19] JOHN AGUDELO, Andrés Agudelo Pedro B. *Effect of altitude and palm oil biodiesel fuelling on the performance and combustion characteristics of a HSDI diesel engine*. 2008
- [20] JOSÉ, Ricardo García S.: *Combustión y combustibles*. (2001)
- [21] LEVENT YUKSEK, Muammer Ozkan Orkun O. *Effects of soybean biodiesel on a DI diesel engine performance, emission and combustion characteristics*. 2012
- [22] LIZHONG SHEN, Jilin Lei Shaohua L. *Effects of altitude and fuel oxygen content on the performance of a high pressure common rail diesel engine*. 2013
- [23] LORMASTER: *Geografía Colombiana*. (2010)
- [24] ÁLVAREZ MOLARES, María J. *Cómo funciona un motor diésel de coche*. 2015
- [25] NGK. *NGK*. 2014
- [26] PYNDICK, ROBERT: *MICROECONOMÍA*. 2010
- [27] QUIJANO, Iván Meléndez A.: IDENTIFICACIÓN DE HIDROCARBUROS AROMÁTICOS POLICÍCLICOS (HAPS) EN EL PM_{2.5} DEL AIRE DE PAMPLONA-COLOMBIA. En: *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica* (2014)
- [28] RENE HEROS, REMI G. ; DUFFAUD, PAUL CHOVIN J. *LE PROBLEME DE LA SURVEILLANCE DU NIVEAU DE POLLUTION D'UNE VILLE PAR LES GAZ D'ÉCHAPPEMENT DES VEHICULES AUTOMOBILES—CAS D'UN TUNNEL AUTOROUTIER*
- [29] RODRIGUEZ, Fernando. *Gases contaminantes en los motores diesel*. 2012

-
- [30] ROMERO, MAURICIO: La mayoría de carros con motores diesel 'se raja' en la prueba de gases. (2008), septiembre
- [31] ROSANNA PEIRÓB, Ferran B.: Transporte, medio ambiente y salud. Informe SESPAS 2008. (2008)
- [32] SCANIA.MX: CARACTERÍSTICAS DE K 360. (2015)
- [33] UNIT-TREND: *UNIT-TREND*. UNIT-TREND, 2014
- [34] UPME: Impactos técnicos, económicos y ambientales de la diselización del parque automotor en Colombia y posibles soluciones. (2002)
- [35] Y. A., M. A. C.: *Termodinámica sexta edición*. Mc Graw Hill., 2011
- [36] YE WU, Zhenhua Li1 Yu Jingnan H.: Real-world fuel efficiency and exhaust emissions of light-duty diesel vehicles and their correlation with road conditions.
- [37] YUNSHAN GE, Xiangyu Feng Xin W. *Effects of altitude on the thermal efficiency of a heavy-duty diesel*. 2013