

**DESARROLLO DE CICLOS DE CONDUCCION PARA EL ÁREA
METROPOLITANA CENTRO OCCIDENTE – AMCO.**

ALEJANDRO HURTADO GÓMEZ

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

PEREIRA

2014

**DESARROLLO DE CICLOS DE CONDUCCION PARA EL ÁREA
METROPOLITANA CENTRO OCCIDENTE – AMCO.**

ALEJANDRO HURTADO GÓMEZ

PROYECTO DE GRADO

INGENIERO JUAN ESTEBAN TIBAQUIRÁ, Ph. D.

Asesor de trabajo de grado

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

PEREIRA

2014

Director trabajo de grado

Evaluador trabajo de grado

Pereira, 10 de septiembre de 2014

DEDICATORIA

Este proyecto de grado está dedicado a mis padres, mis hermanos, mis abuelos y el resto de mi familia en general por su enorme paciencia en este trayecto que al fin termina pero que soportaron porque sabían que era un proyecto que beneficiaría a la comunidad y la región en general.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco de la manera más sincera a las instituciones que me formaron en lo personal y profesional, entiéndase Universidad Tecnológica de Pereira y Colegio Alfonso Jaramillo Gutiérrez.

De estas, debo destacar especialmente la labor de los ingenieros Juan Esteban Tibaquirá –quien me ayudó a culminar esta labor- y a Luis Carlos Ríos –primer asesor que tuve durante la planeación de la investigación-, quienes estuvieron siempre dispuestos a compartir sus conocimientos y aplicar su experiencia en el desarrollo de la investigación. También, a los ingenieros Luis Felipe Quirama, Luis Guillermo Gaviria y Sebastián Ospina Castro y Juliana Muriel Montes quienes apoyaron incondicionalmente todo el proceso de gestión de recursos financieros y tecnológicos.

El agradecimiento más especial para el ingeniero Alexander Trujillo Herrera por haberme acompañado durante todos los ochenta recorridos en las rutas determinadas y pruebas de laboratorio por su infinita paciencia ante todas las dificultades e imprevistos que debimos soportar en el desarrollo del proyecto.

Por último, pero no por menos, a la ambientalista Carmen Lucia Miranda Ortiz, ingeniero Jorge Augusto Montoya, ingeniero Abelino Arias y Paola Andrea Taborda, quienes hicieron posible la obtención de recursos para desarrollar este proyecto de la mejor manera posible. Todo esto gracias al apoyo de CARDER.

1. INTRODUCCIÓN

Los ciclos de conducción permiten conocer el comportamiento de los vehículos en las vías a través de sus emisiones. Los ciclos de conducción han sido desarrollados para proveer un perfil único de velocidad contra tiempo que sea representativo del perfil de conducción urbano. Los ciclos de conducción tienen un amplio rango de usos. Los fabricantes de vehículos necesitan de éstos para generar bases de diseño, construcción y mercadeo a largo plazo. También es fundamental el trabajo de los ingenieros de transporte para diseñar el control del tráfico y hacer simulaciones de paradas y flujo vehicular.

Se pueden encontrar dos tipos de ciclos de conducción, legislativos y no legislativos. Los legislativos son creados por entidades gubernamentales y permiten crear legislaciones para controlar emisiones provenientes del motor. Las emisiones generadas durante el ciclo no deben exceder los valores consignados en las normas.

Los ciclos de conducción no legislativos son creados para calcular las emisiones generadas y el consumo de combustible del motor en laboratorios y como herramienta para la industria automotriz..

Según la topografía de la región, los ciclos varían entre los países que los desarrollen. Es por esto que el ciclo desarrollado en Estados Unidos no puede ser directamente aplicado a la Unión Europea ni a ninguna otra región, y viceversa.

Las emisiones de los automóviles representan la mayor parte de la contaminación del planeta que se vive actualmente, y que genera problemas graves como el calentamiento global, erosión y deshielo en los polos, entre otros efectos ambientales. Y en cuanto a la salud pública genera cuadros clínicos de cáncer en la piel, vías respiratorias y problemas en estas últimas tales como asma y enfisemas pulmonares.¹

La mejor manera de controlar las emisiones es conocer su composición, cantidad emitida por cada kilómetro recorrido. Además del consumo de combustible,

¹ Página web de la Agencia de Protección Ambiental: www.epa.gov

medido en kilómetros por galón utilizado. Conociendo estos parámetros es posible analizar profundamente los procesos de combustión de los vehículos.

Los ciclos de conducción se usan para determinar las emisiones generadas por el parque automotor según el tipo de conducción. Adicionalmente, las curvas de velocidad contra tiempo que se generan pueden ser utilizadas para realizar pruebas de consumo de combustible y emisiones en los laboratorios, aplicables a la región en estudio.

En Colombia se tienen pocos registros acerca de cómo realizar medición de las emisiones en el parque automotor nacional, salvo un estudio realizado por el grupo de investigación en gestión energética (Genergética) de la Universidad Tecnológica de Pereira desarrollado en el año 2007 con el cual se determinaron los factores que inciden en la contaminación ambiental de la ciudad de Pereira y los realizados por el Instituto Colombiano de Petróleos, ICP, de ECOPETROL.

Es por esto que en este proyecto se desea desarrollar un ciclo de conducción corto para el Área Metropolitana Centro Occidente – AMCO. Más específicamente, por las vías donde circulan la mayor cantidad de vehículos en los municipios de Pereira, Dosquebradas y La Virginia con el fin de validar los resultados obtenidos en el año 2007 a través de ciclos de conducción utilizando la misma metodología, y que fue creada en Naucalpán, México para determinar un ciclo típico de conducción en esa ciudad.²

De tal forma en este proyecto se pretende:

- Generar ciclos cortos de manejo en las vías del Área Metropolitana Centro Occidente del Departamento de Risaralda que permitan obtener datos más consistentes sobre el consumo de combustible y las emisiones generadas por los vehículos que se movilizan en las vías de la región en estudio.

Para cumplir con este objetivo, las tareas que se desarrollan son las siguientes:

- Revisar la bibliografía que contiene información sobre los ciclos de conducción desarrollados en otros países.
- Implementar la metodología para desarrollar los ciclos de conducción, de tal manera que pueda ser utilizada en otras regiones del país donde sea necesario implementarlos.

² VELEZ AGUILERA, Alfredo. Determinación de un ciclo típico de conducción en el Municipio de Naucalpan. Toluca, 2005, 92p. Trabajo de grado (Maestría en Ingeniería Automotriz). Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey de México. Facultad de Ingeniería Automotriz. Área de desarrollo sostenible.

- Desarrollar la planeación de las rutas, recorridos y tipos de recorridos.
- Gestionar los recursos necesarios en lo que se refiere a los vehículos que serán usados en las pruebas de ruta, la instrumentación y el combustible.
- Instrumentar los vehículos para realizar las mediciones necesarias (velocidad, aceleración, emisiones y tiempos de los recorridos).
- Caracterizar el comportamiento de los vehículos de acuerdo al tipo de conducción realizado y según la ruta recorrida.
- Realizar medición de las emisiones generadas durante las pruebas de ruta junto con las otras variables.
- Realizar un tratamiento estadístico de los datos obtenidos en las pruebas de ruta para obtener una aproximación de estos a un tipo de conducción ideal, y que permitirán la simulación en dinamómetro para generar el ciclo.

En los capítulos siguientes se dará a conocer el estado actual de los ciclos de conducción, y cuál ha sido su influencia a lo largo del desarrollo de la industria automotriz, así como también los más reconocidos internacionalmente.

Ciclos como el Federal Test Procedure (FTP), desarrollado en Estados Unidos, y el ARTEMIS, proveniente de Europa, han abierto un camino muy útil para conocer la manera en que las emisiones del parque automotor afectan el medio ambiente, y de igual manera cuantificar niveles de congestión en las vías de las regiones estudiadas.

Posteriormente, se dará un breve repaso acerca de los fenómenos conocidos como Calentamiento Global, Cambio Climático y Gases de Efecto Invernadero, y la manera en que la industria automotriz ha contribuido a que estos ocurran,

Para finalizar con la explicación de la metodología experimental aplicada en este proyecto y los resultados obtenidos gracias al tratamiento estadístico con los cuales se podrán generar unos productos que pueden ser de utilidad para la industria automotriz colombiana y las entidades encargadas de legislar en ambiente, movilidad y transporte para tener un mejor control de estas variables.

2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1. CICLOS DE CONDUCCIÓN

Los ciclos de conducción son estudios estadísticos basados en la velocidad de un parque automotor específico –particular, servicio público y/o carga- en una región determinada. Esto permite generar un perfil de velocidad contra tiempo convirtiéndolos en una herramienta muy útil para la industria automotriz y las entidades reguladoras de emisiones alrededor del mundo.

Por el momento, varios países que cuentan con estos ciclos, siendo los más desarrollados, en países y regiones tales como: Estados Unidos de América, México, Japón, Australia, la Unión Europea y la isla de Hong Kong en China, entre otros.

A continuación, se referencian los más representativos, y que han servido como base para la obtención de otros ciclos:

2.1.1. Ciclo de conducción para Estados Unidos de América

Entre los ciclos más representativos se pueden encontrar los ciclos realizados en Estados Unidos de América, denominados como Procedimiento Federal de Pruebas (FTP por sus siglas en inglés). Fue creado para darle normatividad a los inventarios de emisiones y consumo de combustible en los vehículos livianos de Estados Unidos de América.

FTP 75 es una variante del Itinerario de Conducción Urbana en Dinamómetro, (en inglés, UDDS). Además, es una derivación del FTP 72, al cual le fueron añadidos 505 segundos en su tiempo de recorrido con un arranque en caliente.

La primera fase consiste en una fase de transición de 505 segundos con arranque en frío a temperatura ambiente entre 20°C y 30 °C. Luego, una segunda fase de estabilización del segundo 506 hasta los 1372 segundos, con periodos de temperatura máxima con límites de tiempo de 540 segundos mínimo y 660 segundos máximo.

La última fase consiste en el arranque en caliente con una duración de 505 segundos.

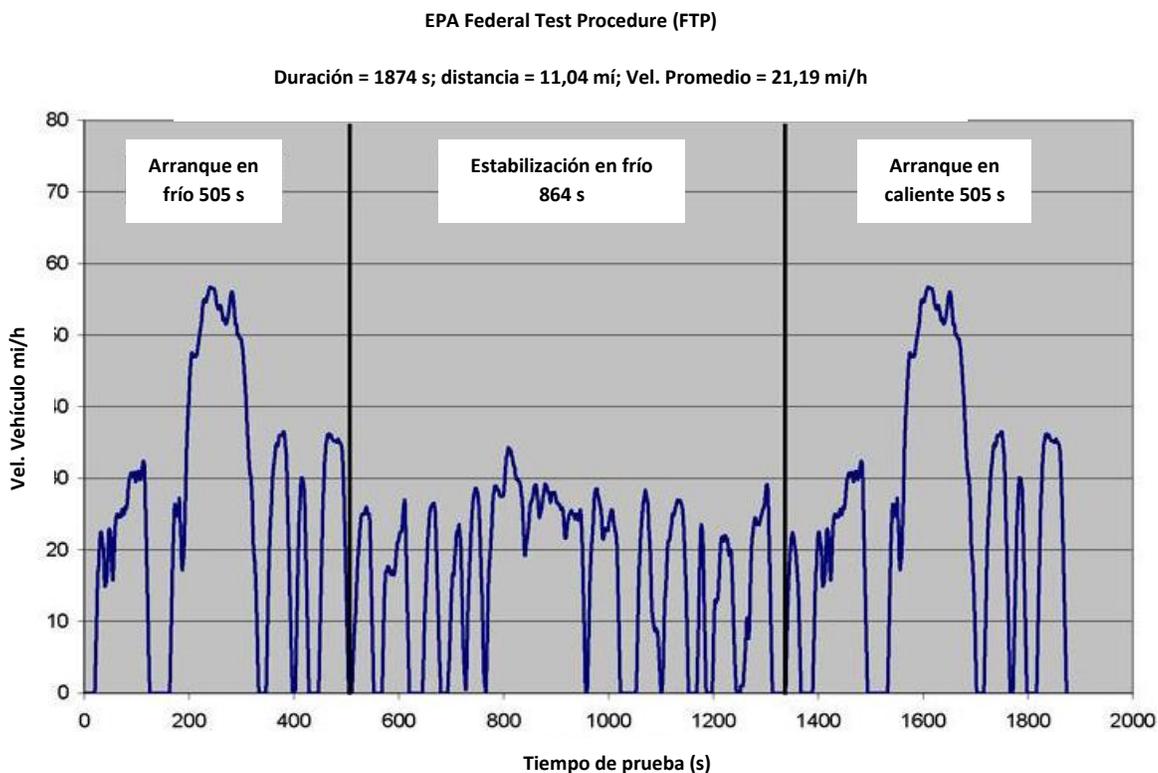
Estos ciclos tuvieron su origen en la ciudad de Los Ángeles, donde se realizaron recorridos en un trayecto típico de conducción con una distancia total recorrida de

12 millas (19,2 km) en un vehículo instrumentado para tomar medidas de presión en el múltiple de admisión, velocidad del motor (revoluciones por minuto) y velocidad del vehículo mi/h.

Más adelante se redujo la distancia de recorrido a 7,46 millas (11,94 km) sin modificar las velocidades promedio, formando así el UDDS, lo cual permitió obtener una referencia de la cantidad de emisiones generadas por los vehículos.

Posteriormente, se creó un nuevo ciclo llamado LA-92 para el estado de California. Allí se le hicieron seguimientos a vehículos de baja potencia en 102 rutas del lado sur de la costa. Las rutas fueron seleccionadas según los datos tomados de la Asociación Meridional de California del modelo de sistema urbano de planeación del transporte. En estas pruebas se utilizaron dos vehículos, los cuales consistían en un vehículo de pruebas y otro vehículo de caza. El vehículo de pruebas enviaba la información generada por la velocidad, la aceleración, la presión en el múltiple, entre otros parámetros al vehículo caza; y el vehículo caza mantenía una distancia uniforme al de pruebas para recibir todos los datos.

Figura 2. Perfil de velocidad vs tiempo FTP 75.



Fuente: Página web Agencia de Protección Ambiental, EE. UU.

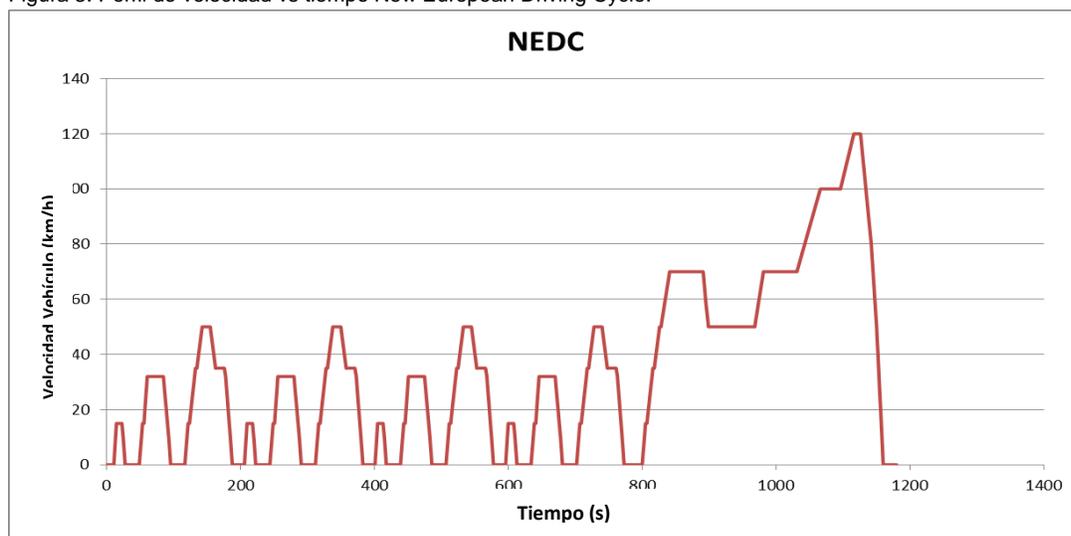
2.1.2. Ciclo de conducción para Europa

En Europa se generaron ciclos de conducción para varios países, y que llevaron a un ciclo general llamado Artemis, en el que se descubrió que la mayor representación del parque automotor europeo estaba en Alemania, Italia e Inglaterra.

Este ciclo se compone de dos partes repartidas de la siguiente manera:

- 2.1.2.1. **Primera parte:** se realiza un recorrido seguido de cuatro repeticiones en vías urbanas y los vehículos de prueba no superan los 50 km/h, por ser la máxima velocidad permitida por la legislación local.
- 2.1.2.2. **Segunda parte:** se realiza un recorrido seguido por una repetición con el fin de simular la conducción en el área rural.
- 2.1.2.3. **Nuevo Ciclo de Conducción Europeo (en inglés, NEDC).** Es un ciclo altamente estilizado que se usa para darle aprobación al parque automotor europeo de vehículos livianos con periodos de aceleración, deceleración y velocidad constantes, manteniendo una estrecha relación con las condiciones de conducción reales en ruta.³

Figura 3. Perfil de velocidad vs tiempo New European Driving Cycle.



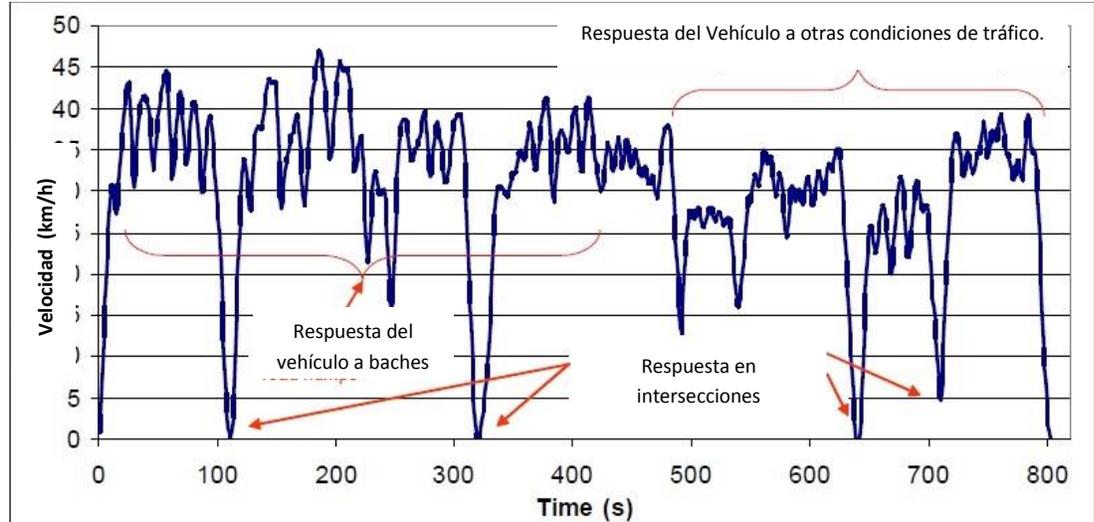
Fuente: A reference book of driving cycles for use in measurement of road vehicle emissions, versión 3. 2009.

- 2.1.2.4. **TRAMAQ UG 214** es un ciclo conformado por datos tomados directamente de automóviles en su uso regular en ruta. En

³ BARLOW, TJ; LATHAM, S; MCRAE, I S; BOULTER, PJ. A reference book of driving cycles for use in measurement of road vehicle emissions, versión 3. Reporte de proyecto. Reino Unido; Transportation Research Laboratory. 2009. 2 p.

ocasiones, un ciclo puede ser generado con los datos obtenidos de un solo recorrido.³

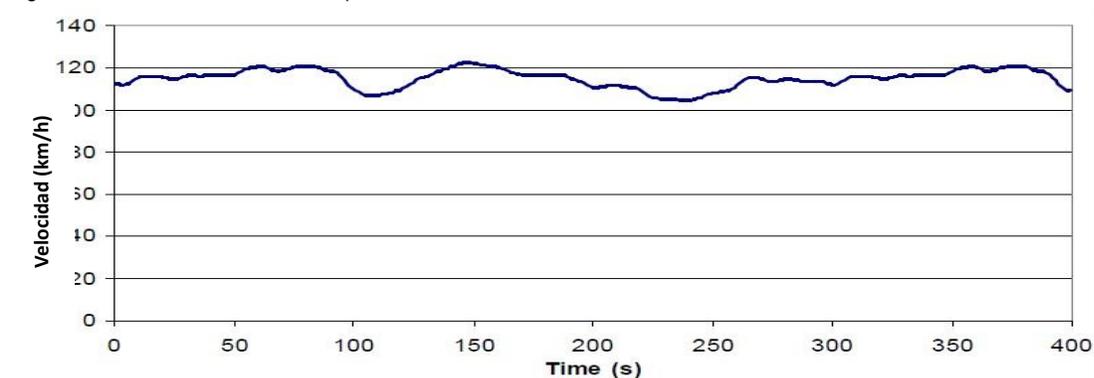
Figura 4. Perfil de velocidad vs tiempo ciclo TRAMAQ UG 214.



Fuente: A reference book of driving cycles for use in measurement of road vehicle emissions, versión 3. 2009.

2.1.2.5. EMPTA T115 es un ciclo construido con base en la aproximación a la conducción estable; es decir, acercar el perfil de velocidad a un valor constante tanto como sea posible, que como se conduce en autopista a velocidad de crucero. Cuando se trata de conducir a la misma velocidad, ciertos factores influyen en el recorrido, como lo son la posición del acelerador, el gradiente de la vía y el tráfico que se pueda encontrar quien conduce.³

Figura 5. Perfil de velocidad vs tiempo ciclo EMPTA T115



Fuente: A reference book of driving cycles for use in measurement of road vehicle emissions. 2009

2.1.3. Ciclo de conducción para Australia

Fue desarrollado para 17 patrones de vehículos entre livianos y pesados durante un uso normal.

Los datos fueron manejados a través de las curvas de velocidad comparadas contra el tiempo en lo que se llamó micro viajes, pues eran periodos en los que se partía de cero, luego de un periodo de descanso, seguido por periodos de aceleración, y desaceleración hasta llegar nuevamente al reposo.

Según el tipo de micro viaje estos fueron clasificados en ciclos urbanos, extra-urbanos, rurales y autopista. Derivados de éstos salieron los ciclos más representativos para finalmente armar un ciclo general representativo de las emisiones urbanas (CCEU) de aproximadamente 60 minutos de duración para cada tipo de vehículo, estos ciclos fueron llamados ciclos de referencia.

Después se realizó un ciclo de conducción de emisiones urbanas compuestas (CCEUC), que dura 30 minutos, derivado de cada uno de los ciclos anteriores realizados para que sean más apropiados para las pruebas.

Luego, los ciclos fueron depurados hasta que sólo quedaran los que permitían hacer pruebas más cómodas, los que tenían menos paradas y mejores curvas de velocidad para que se puedan simular en el dinamómetro de la mejor manera.

2.1.4. Ciclo de conducción para Hong Kong

Para la realización de este ciclo fue necesario localizar dos rutas en diferentes zonas urbanas de la ciudad utilizando un vehículo Toyota Hiace, de transmisión manual y motor diesel.

Los datos fueron recopilados entre las 8:00 am y las 11:00 am en los meses de septiembre a diciembre del año 1997; tiempo en el cual se pudieron determinar 12 recorridos, distribuidos en media docena para la península de Kowloon, y los otros seis para la isla de Hong Kong.

Después de haber recorrido los trayectos, se hace un promedio de los datos recopilados entre las dos áreas de estudio y otro promedio individual para cada área. La diferencia de los datos no puede exceder el 5% del promedio para que sean tomados en cuenta en el ciclo de manejo. La duración de cada recorrido es de un minuto y se hicieron veinte recorridos para así formar un ciclo total de 20 minutos.

2.1.5. Ciclo de conducción para Ciudad de México D.F., México

El grupo de trabajo del Laboratorio de Control de Emisiones de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México propuso en 1998 al

Gobierno del Distrito Federal un proyecto para desarrollar ciclos de conducción para vehículos ligeros. De esta manera, aprobada la propuesta, se instrumentó un vehículo Nissan Ichi Van modelo 1993, para monitorear la velocidad del vehículo cada segundo, la posición de la mariposa del carburador y la temperatura del aceite de lubricación.

La recolección y almacenamiento de la información se hizo a través de un sistema de adquisición de datos a bordo (SADAB), que fue desarrollado en el mismo laboratorio para este fin específico.

Los muestreos fueron realizados entre noviembre de 1998 y mayo de 2000, abarcando 5 zonas del Valle de México.

2.1.6. Ciclo de conducción de Vigo, España.

Este ciclo fue desarrollado por investigadores de la Universidad de Vigo para caracterizar el comportamiento de una camioneta con motor eléctrico. Para esto fueron seleccionados los comportamientos representativos del parque automotor que se desplaza en la región de estudio; en este caso, el Ayuntamiento de Vigo.

A partir de lo anterior, se desarrollaron tres ciclos diferentes, y señalados en su orden por las letras A, B o C, dependiendo de su nivel de exigencia, A siendo el menos exigente y C el más complejo:

2.1.6.1. CCV-A

Las vías utilizadas para tomar las mediciones de velocidad fueron las comprendidas entre Parque Móvil – Caboestai – Teis – Parque Móvil.

Este sector tiene pocas detenciones, y permite velocidades moderadas que pueden ser mantenidas constantes durante los 36,4 km de recorrido, obteniéndose una velocidad media de 34,5 km/h y un cambio en la altura del terreno de 130. Cuenta con 25 paradas que consumen el 9% del tiempo de recorrido.

2.1.6.2. CCV-B

Este recorrido comprende las vías desde el Parque Móvil – CUVI – Parque Móvil. Sus pendientes son más pronunciadas. Tiene 490 segundos de duración y una velocidad media de 40 km/h.

2.1.6.3. CCV-C

Se recorren las calles céntricas, partiendo y volviendo a Parque Móvil en horas pico. El recorrido es urbano, presenta tráfico denso, con aceleraciones y deceleraciones continuas con pendientes fuertes. Este recorrido tiene, además, paradas en semáforos y embotellamientos periódicos, pero de corta duración.

2.2. EFECTOS DE LAS EMISIONES VEHICULARES

2.2.1. Cambio climático

Durante el siglo XX la temperatura promedio del planeta en la superficie terrestre se ha incrementado de manera sostenida. Las causas son variadas, pero la que más ha influido es la acumulación de gases de efecto invernadero acumulándose en la atmósfera, y que ha conllevado al fenómeno conocido como cambio climático.

Al producirse cambios en la temperatura global de manera creciente y sostenida por periodos de tiempo extensos, haciendo que las mediciones de temperaturas promedio sean más altas en comparación con registros históricos. También genera variaciones en precipitaciones, haciéndolas más recurrentes junto con cambios en los patrones de viento, deshielo y aumento de la temperatura de los ríos y mares, ocasionando que se afecten los ecosistemas que habitan en estos.

2.2.2. Gases de efecto invernadero

Son los gases que se acumulan en la atmósfera luego de ser emitidos por fuentes móviles y estáticas luego de realizar la combustión para generar un trabajo determinado. Las fuentes móviles representan el mayor porcentaje en la creación de estos gases.

El aumento de la temperatura ocurre cuando estos gases se elevan a la atmósfera por la disminución de la densidad y aumento de volumen debido a sus elevadas temperaturas de emisión. Al igualar esta densidad a la del aire a gran altura, los gases se equilibran y dejan de elevarse.

Estos gases se componen principalmente de dióxido de carbono (CO₂), gas metano (CH₄), óxidos nitrosos (NO_x) y gases fluorados (CFC's y HCFC's). Esos últimos son muy utilizados en la industria de la refrigeración pues no dañan la capa de ozono. Sin embargo, son 23000 veces más generadores de GEI que el

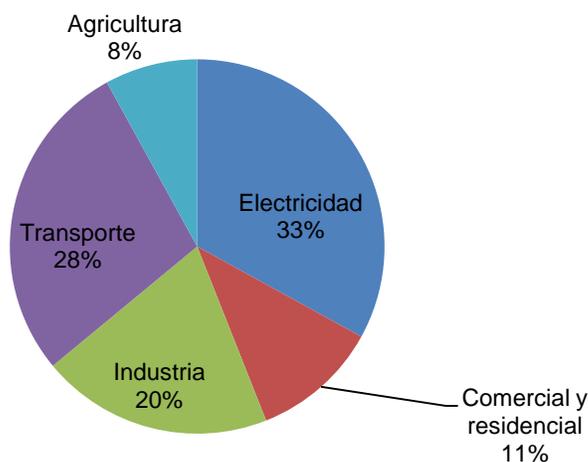
CO₂.⁴ Los GEI deberían ser absorbidos por la vegetación, sin embargo la gran cantidad de gases emitidos y la disminución de las selvas y bosques debido a la deforestación no permiten que este proceso se cumpla satisfactoriamente, creando un remanente que se queda en el ambiente. Al no ser absorbidos, estos gases absorben la energía restante proveniente del Sol que, al ser rechazada por la tierra debería salir nuevamente del planeta, pero son reflejadas nuevamente hacia la tierra aumentando su temperatura, haciendo un fenómeno parecido al de un vehículo totalmente cerrado expuesto al Sol.

En el año 2011 fueron emitidas al ambiente más de 6,7 millones de toneladas métricas de CO₂ representando el 84% del total de gases de efecto invernadero, solo en Estados Unidos de América⁵.

La responsabilidad del aumento en la cantidad de gases de efecto invernadero en los últimos 150 años recae sobre el ser humano.

En la siguiente gráfica se muestra el porcentaje de CO₂ generado por cada sector económico en el año 2011:

Figura 1. Distribución de aportes de CO₂ por sector económico.



Fuente: página Agencia de Protección Ambiental, EE.UU.

En lo que concierne a este proyecto, las emisiones generadas por transporte representan el 28% del CO₂ al utilizar combustibles fósiles. El 90% de estos combustibles provienen del petróleo, entre los que se incluyen la gasolina y el diesel.

⁴ Página web Comisión Europea. Políticas de Acción Climática.

⁵ Sitio web: Agencia de Protección Ambiental, EE. UU.: www.epa.gov

De acuerdo con el inventario de Gases de Efecto Invernadero medido por el IDEAM, en Colombia se aportaron $21,769 \cdot 10^9$ gramos de CO_2 equivalente; es decir, la equivalencia que hay entre la cantidad de los demás gases emitidos y el dióxido de carbono hasta el año 2004. Estos se miden bajo el índice Potencial de Calentamiento Global, como se muestra a continuación:

Tabla 1. Potencial de gases en unidades de CO_2 .

Nombre del compuesto	Formula química	Potencial de Calentamiento Global (PCG o GWP)
Dióxido de carbono	CO_2	1
Metano	CH_4	21
Óxido Nitroso	N_2O	310
Tetrafloruro de carbono	CF_4	6500
Hexafloruro de carbono	C_2F_6	9200
Hexafloruro de azúfre	SF_6	23900
Trifluorometano	HFC-23	11700
Difluorometano	HFC-32	650
Pentafluorometano	HFC-125	2800
Trifluoroetano	HFC-143	3800
Difluoroetano	HFC-152	140
Tetrafluoroetano	HFC-134	1300

Fuente: IDEAM. Gases de Efecto Invernadero, 2009.

Debido a la variabilidad de los diferentes gases se hace necesario generar una equivalencia de cada gas en unidades de CO_2 , permitiendo la comparación entre ellos y sus consecuencias. Esta tabla representa los resultados proyectados a cien años en el IPCC assessment report⁶.

2.3. Relación entre los ciclos de conducción y los inventarios de emisiones

Gran cantidad de sustancias contaminantes son generados por combustión se emiten a la atmósfera por parte de los vehículos automotores. Emisiones de monóxido de carbono (CO), compuestos orgánicos volátiles (en inglés, VOC's), óxidos de nitrógeno (NO_x) y material particulado (PM) son regulados por los gobiernos de los países más desarrollados, (Asia, EE. UU., Unión Europea).

⁶ IPCC: Intergovernmental Panel On Climate Change. IDEAM, Gases de Efecto Invernadero. 2009

En la Unión Europea todos los vehículos livianos deben aprobar pruebas de emisiones requeridas por la ley, y solo en los motores para vehículos cuyo peso es superior a 3,5 toneladas.

Con un ciclo de conducción se pueden medir las emisiones generadas por un automotor en el laboratorio cuando los datos obtenidos durante las pruebas en ruta han sido tratados estadísticamente, de tal manera que advierta una representatividad de lo obtenido con la realidad de los vehículos que circulan por la región estudiada. Al tener organizados todos los parámetros, se utilizan equipos como dinamómetros, analizadores de gases y módulos de consumo de combustible para simular, tanto como sea posible, las condiciones verdaderas de la ruta y emitir resultados que den a conocer el consumo, cantidad y caracterización de gases generados, así como las condiciones de la ruta.⁷

2.4. Inventarios de emisiones a través de los ciclos de conducción

Los inventarios de emisiones son los datos obtenidos de la cantidad de gases generados por cada vehículo que circule por las vías estudiadas. Estos resultados son medidos en unidades de unidades de masa de gases emitidos por unidad de distancia por cada vehículo. Las unidades más comunes para representar estos inventarios son las usadas por el Sistema Internacional [$\text{g}/(\text{km-vehículo})^{-1}$].

Cada sector automotor tiene su ciclo representativo y se le otorga su respectiva función de emisiones-velocidad promedio. Estas funciones son utilizadas ampliamente en inventarios nacionales, pero son mucho más utilizadas para predecir emisiones contaminantes en regiones localizadas. Sin embargo, se duda de la capacidad del factor velocidad promedio pues no se tiene certeza sobre los rangos de operación vehicular y comportamiento de emisiones. Esto toma especial relevancia cuando los vehículos nuevos, equipados con catalizadores, para los que una gran proporción de gases contaminantes son reducidos de manera exagerada, generando picos muy agudos especialmente durante los cambios de marcha.

⁷ BARLOW, TJ; LATHAM, S; MCRAE, I S; BOULTER, PJ. A reference book of driving cycles for use in measurement of road vehicle emissions, versión 3. Reporte de proyecto. Reino Unido; Transportation Research Laboratory. 2009. 1 p.

2.4.1. Inventarios de emisiones

De acuerdo con el estudio realizado por la Universidad de Los Andes⁸, los valores aceptados para los diferentes gases en Bogotá son los indicados en la siguiente tabla:

Tabla 2. Valores de aceptación por cada tipo de gas emitido.

Categoría Vehicular	CO₂ (g/km)	CO (g/km)	NO_x (g/km)
Vehículo prueba 1	230 ± 40	7 ± 3	0,7 ± 0,2
Vehículo prueba 2	310 ± 20	9 ± 5	0,8 ± 0,5
Vehículo prueba 3	220 ± 50	60 ± 20	1 ± 0,5
Vehículo prueba 4	300 ± 40	70 ± 25	2 ± 1

Fuente: Actualización del inventario de emisiones de fuentes móviles para la ciudad de Bogotá a través de mediciones directas.

2.5. Distribución t-Student.

Esta distribución permite determinar los rangos de aceptación de muestras pequeñas de una distribución mucho mayor. Fue creada por W.S. Gosset para medir secretamente la distribución de las muestras en la cervecería donde trabajaba y cuyos resultados fueron publicados por él mismo bajo el pseudónimo "Student"; es por esto que se le conoce como distribución t-Student.

La apariencia de esta distribución es de una campana gaussiana, pero solo depende de \bar{x} y S^2 .

La fórmula que define los resultados de las muestras t-Student está conformada de la siguiente manera:

$$S = \bar{X} \pm (t * \frac{\sigma}{\sqrt{n}}) \quad (3)$$

Dónde:

\bar{X} : Promedio de la muestra

⁸ Rodríguez, P.A.; Behrentz, E. Actualización del inventario de emisiones de fuentes móviles para la ciudad de Bogotá a través de mediciones directas. Universidad De Los Andes. Bogotá, Colombia. 2009

t : Cuantil (tomado de tabla)

σ : Desviación estándar

\sqrt{n} : Raíz cuadrada del número de datos

Lo anterior define el rango de aceptación de la muestra estadística, definiendo cuanto por encima o por debajo del valor obtenido puede tolerarse para tener un resultado satisfactorio en la medición de las emisiones.

Para determinar estos intervalos, se debe determinar primero el nivel de confiabilidad que se desea implementar a la muestra. Para este caso, se recomienda tomar una confiabilidad entre 95% y 100%, por lo cual se escoge el punto medio entre estos, 97,5%. Luego se calcula el número de grados de libertad, que para este caso es 3, pues se toma el número total de datos menos uno.

3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Introducción.

En este capítulo se explica de manera detallada la metodología empleada para la construcción del ciclo AMCO, comenzando por la búsqueda bibliográfica basándose en ciclos hechos en otros países. Este tipo de investigaciones son la razón de ser del Grupo de Investigación en Gestión Energética –Genergética- de la Universidad Tecnológica de Pereira, avalado por Colciencias, y en el que se desarrollan investigaciones sobre producción más limpia, que es la razón principal de la creación de ciclos de conducción, derivando en otros ramas de la investigación, como lo son la investigación en incrementar la eficiencia en el consumo de combustible y de la potencia en motores de combustión interna .

Desde este momento se explicará cómo se procede a seleccionar las rutas que puedan representar de la mejor manera las condiciones de manejo en la región estudiada. Luego, se sigue con la instrumentación del vehículo de pruebas con los equipos necesarios para realizar las mediciones y recopilación de los datos que se generen durante los recorridos de prueba, para darle paso a la organización y selección de estos con el fin de tratarlos estadísticamente.

Por último, después de tener seleccionado el ciclo que se designó como representativo, se procede a simularlo en laboratorio para hacer pruebas de emisiones y tomar las medidas de los gases emitidos durante las pruebas.

3.1. Pruebas en carretera

3.1.1. CONSTRUCCIÓN DEL CICLO

Para el desarrollo de este ciclo de conducción representativo del Área Metropolitana Centro Occidente del Departamento de Risaralda, se tuvieron en cuenta las vías principales de esta región, pero resaltando el hecho de que estas

vías deben permitir la comunicación entre las 3 ciudades que la componen (Pereira, Dosquebradas, La Virginia). De igual manera, se escogieron para que el recorrido cubriera las zonas por donde más vehículos transitaran, pero que también el tránsito por esta zona se presentará de manera más directa para comunicarse entre las ciudades comprendidas.

Puesto que uno de los objetivos de los ciclos de conducción es permitir la medición estadística de factores que afectan la calidad del aire por el parque automotor en la región de estudio, se escogieron horas de máximo flujo vehicular y congestión, mejor conocidas como horas pico (8 am, 12 pm y 6 pm). Para optimizar los recursos, fue necesario escoger dos de las tres horas pico que se presentan durante el día, por lo cual fueron seleccionados los horarios de las 8 am y las 12 pm, excluyendo así, las 6 de la tarde.

Los parámetros que se midieron fueron velocidad y tiempo de recorrido, que se obtuvieron gracias a los equipos de recopilación de datos, consistentes de un computador portátil marca Toshiba Satellite, un analizador de gases portátil marca Gallio y un sensor de GPS Marca Sky Trak. Con estos, es posible extraer las aceleraciones positivas y negativas, números de paradas y tiempos en ralentí.

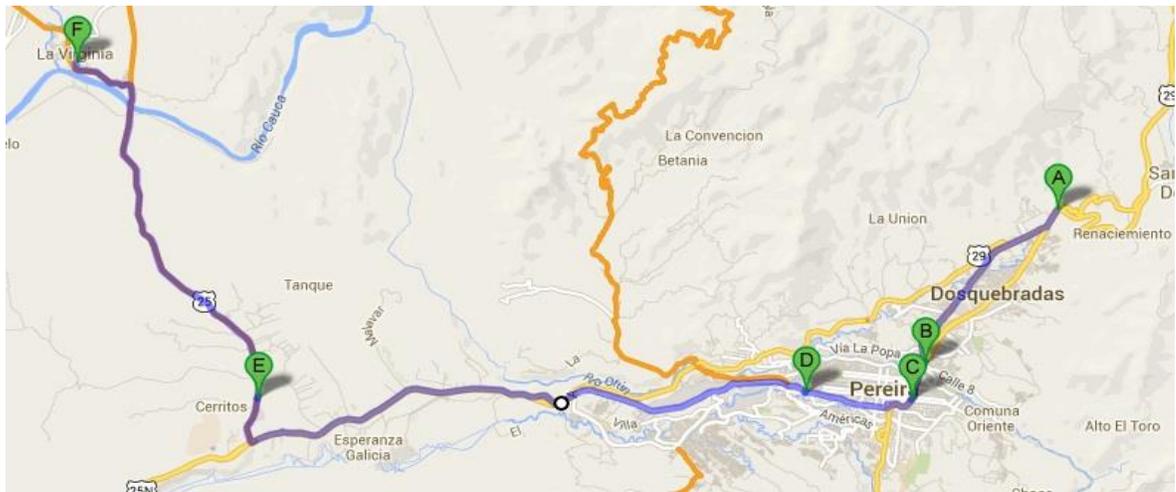
La metodología que se utilizó fue la misma usada en un proyecto “Estimación de factores de emisión que inciden sobre la contaminación ambiental generada por el parque automotor en Pereira”, realizado en el año 2006.⁹

Las vías seleccionadas fueron definidas como ruta 1 y ruta 2. La ruta 1 comprende la Avenida del Ferrocarril, en Dosquebradas, partiendo desde La Romelia, llegando a Pereira a través del Viaducto Cesar Gaviria Trujillo, conectando con la Avenida del Ferrocarril de esta ciudad, siguiendo por la carrera 12, calle 18, Avenida 30 de agosto, Cerritos y finalizando en el parque principal del Municipio de La Virginia (figura 6). La Ruta 2 está compuesta por la Avenida de Las

⁹ Estimación de factores de emisión que inciden sobre la contaminación ambiental generada por el parque automotor en Pereira. Universidad Tecnológica de Pereira. 2007.

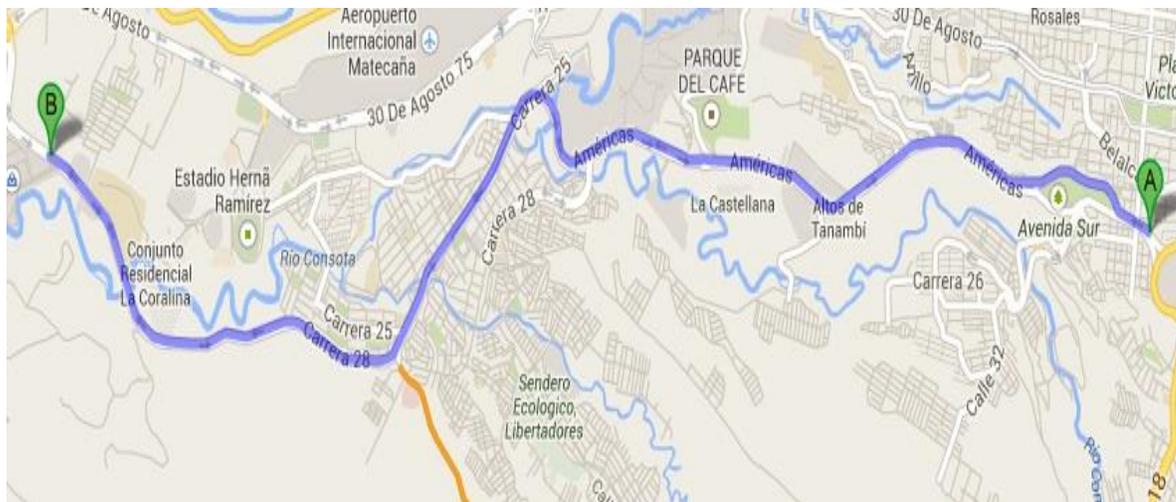
Américas, en el tramo comprendido entre el Museo de Arte de Pereira y Mercasa. En esta ruta se cambiaron los sentidos de recorrido, puesto que los índices de congestión cambian de acuerdo a la hora pico. A las 8 am se realizó el recorrido partiendo desde Mercasa y volviendo a este punto, mientras que al mediodía se arrancó desde el Museo, y finalizando allí mismo (figura 7).

Figura 6. Mapa de Ruta 1 La Romelia – La Virginia.



Fuente: Google Maps. 2014

Figura 7. Mapa de Ruta 2 Mercasa.



Fuente: Google Maps. 2014.

De acuerdo con la metodología empleada, cada recorrido, en cada horario, debe realizarse 20 veces. La metodología usada en Naucalpán, México¹⁰ proponía la realización de 30 muestras, pero debido a la disponibilidad de recursos se concluyó que con 20 recorridos por cada ruta y horario se podía obtener una muestra representativa; es decir, 80 recorridos en total. Los datos fueron adquiridos a través de un equipo GPS (Tabla 2) que va conectado a un analizador de gases portátil, y que, a su vez, va conectado a un computador portátil que cuenta con un programa de adquisición de datos (figura 8 y 9). Este programa guarda los datos de velocidad en un archivo de extensión .dat (figura 8), que pueden ser descargados para manipularlos en Excel o cualquier programa de tratamiento estadístico de datos.

Figura 8. Computador portátil para adquisición de datos

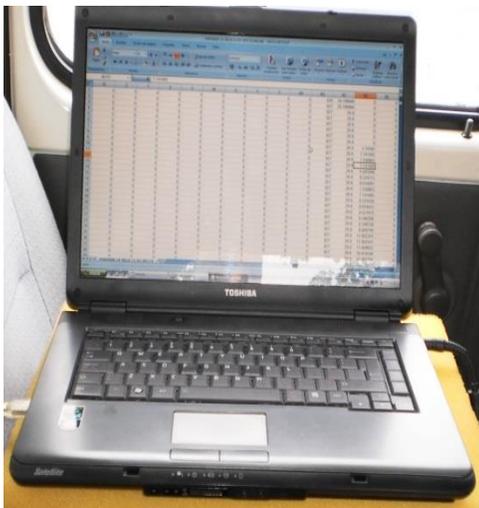
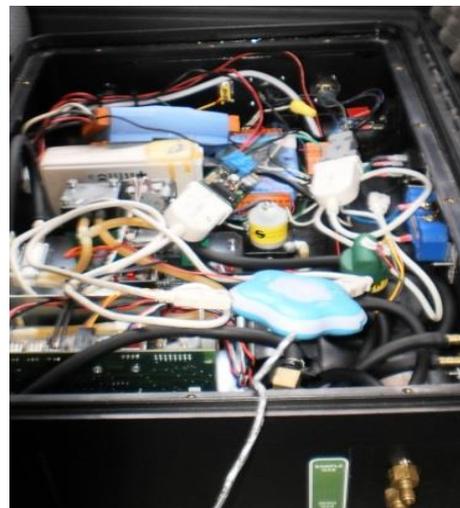


Figura 9. Modulo portátil analizador de gases.



Fuente: Laboratorio de pruebas dinámicas automotrices, Universidad Tecnológica de Pereira.

Tabla 3. Especificaciones técnicas Sky Trak 7 Hz.

Especificaciones físicas		Funciones estándar
Tamaño	3,5 pulgadas	
Longitud del cable	15 pies	
Voltaje/corriente	4,8 a 16 V/0,1 A max.	<ul style="list-style-type: none"> • 7 actualizaciones por segundo • GPS, antena y

¹⁰ Estimación de factores de emisión que inciden sobre la contaminación ambiental generada por el parque automotor en Pereira. Universidad Tecnológica de Pereira. 2007.

Especificaciones físicas		convertidor velocidad a pulso integrados <ul style="list-style-type: none"> • Alta adquisición y sensibilidad de rastreo por receptor GPS de 50 canales • Precisión de 0,1 mph para 0,5 mph - 50 mph
Conector	Raven®	
Temperatura de operación	-40°C - +65°C -40°F - +149°F	
Condiciones de humedad	100% Condensando	
Especificaciones de desempeño		
Precisión de velocidad	0,1 mph (sin SA)	
Tasa de actualización por GPS	7 Hertz	
Tasa de adquisición		
Inicio	<1 minuto	

Fuente: Pagina web www.squibbtaylor.com

Debido a ciertas situaciones que complicaban o no permitían la medición, se vio la necesidad de crear una metodología básica para tomar las muestras, consistente en realizar paradas programadas para evitar una pérdida masiva de datos en caso de falla del equipo. También se hace necesario que no se manipule ninguno de los componentes del equipo durante la medición, pues esto hace que el computador se bloquee, perdiendo los datos obtenidos hasta el momento, haciendo que el proceso deba repetirse. También se pudo comprobar si el equipo estaba adquiriendo y salvando datos al mirar en la carpeta de destino del archivo cuando se podía constatar el cambio ascendente en el tamaño del archivo. Esto se logra seleccionando el archivo sin abrirlo antes de empezar a tomar los datos para que aparezca la información en la parte baja de la carpeta que lo contiene. Al hacer esto, no se debe abrir el archivo, solo seleccionarlo.

Los datos generados solo corresponden a velocidad. Dado que el equipo genera un dato por segundo, quiere decir que el valor encontrado en cada celda corresponde a la velocidad, en km/h, en cada segundo medido. El tiempo total de recorrido, por consiguiente, es el número de celdas que contengan valores asignados. Sin embargo, se debe tener en cuenta que, según el procedimiento descrito a continuación, los primeros datos siempre serán iguales a cero. Para

sobrepasar esto, se recomienda asignar el dato número 1 a la celda que contenga el cero anterior a la celda tenga el primer valor diferente de cero.

La recopilación de datos debe iniciarse de acuerdo a los siguientes pasos:

1. El vehículo debe estar detenido.
2. Se recomienda que se inicie el recorrido cuando el tamaño del archivo haya cambiado, por lo menos, tres veces. Para esto se utiliza el cuadro inferior del marco de la ventana del programa computacional. Esto garantiza que el sistema está registrando correctamente, y se debe revisar el tamaño de este archivo constantemente para detener el proceso en caso de falla.
3. Se recomienda mantener la ventana del programa en forma restaurada, mientras la carpeta de destino debe estar detrás de esta, maximizada, para poder monitorear efectivamente el tamaño del archivo.
4. Como los recorridos son todos diferentes en sus tiempos, es necesario revisar constantemente estas duraciones para determinar si hay recorridos que son extremadamente largos o cortos con respecto a los demás. En caso tal, se recomienda no trabajar con esos recorridos pues no son representativos de la muestra que se está tomando. Regularmente estos recorridos se dan porque se presentan trancones por accidentes, retenes, entre otros, y debido a su espontaneidad, no hacen parte de las condiciones representativas del ciclo.

El análisis estadístico se realizó teniendo en cuenta algunas de las medidas de tendencia central aplicadas en estadística general, como son la media, la mediana, la desviación estándar y el coeficiente de variación.

En la metodología aplicada a este proyecto de investigación, se propone utilizar factores de ponderación para medir los parámetros seleccionados para construir el ciclo, asignándole un peso a cada parámetro, siendo los que tengan mayor peso aquellos que tengan más influencia en el ciclo. Estas ponderaciones se multiplican por el valor absoluto de la diferencia que hay entre el valor del parámetro y el

promedio de ese parámetro en cada recorrido, esto es más conocido como desviación estándar. El valor absoluto se utiliza debido a que estos valores deben dar en números positivos:

$$y = \sum f_i \cdot |x_i - \bar{x}| \quad (1)$$

Dónde:

y: Valor del parámetro medido

f_i : factor de ponderación para cada parámetro

$|x_i - \bar{x}|$: Desviación estándar en valor absoluto

Los valores de ponderación se asignaron en múltiplos de 0,25, siendo 1 el valor máximo. A continuación se muestran los parámetros con su respectiva ponderación:

Tabla 4. Ponderación de parámetros.

PARÁMETRO	PONDERACIÓN
Velocidad promedio	1
Velocidad máxima	0,25
Tiempo ralenti	0,75
Número de paradas	0,25
Tiempo total de recorrido	1
Distancia recorrida	1
Aceleración promedio positiva	1
Aceleración positiva máxima	0,75
Tiempo con aceleración positiva	1
Total	7

Fuente: Diseño y aplicación de una metodología para determinar ciclos de conducción vehicular en la ciudad de Pereira

Debido a que las unidades resultantes en estos cálculos no se pueden comparar, se hace necesario modificar la ecuación para obtener resultados adimensionales. Así es posible comparar los diferentes resultados entre sí (Anexos A.1, A.2, A.3, A.4).

La modificación da como resultado la siguiente ecuación:

$$y = \min \left(\sum_i W_i \cdot \frac{|P_{i,j} - \bar{P}|}{\bar{P}} \right) \quad (2)$$

Dónde:

W_i peso de la ponderación del parámetro i dividido el total de las ponderaciones

P_i valor del parámetro i , para el ciclo j

\bar{P} Promedio del parámetro i

$\frac{|P_{i,j} - \bar{P}|}{\bar{P}}$ Desviación respecto a la media en términos adimensionales

Teniendo presente que los recorridos son diferentes en términos de su duración y flujo vehicular, se hace necesario dividir los recorridos por paradas para aumentar la precisión en la selección de los datos que serán los utilizados para construir el ciclo definitivo. Para esto se toman los datos por tramos de recorrido; es decir, programar paradas preestablecidas en los recorridos y que estas se mantengan durante los veinte recorridos para mantener la uniformidad de la recopilación.

Los puntos programados de detención fueron cuatro para la ruta 1 y uno para la ruta 2, distribuidos así, en su orden¹¹:

Ruta 1:

- Entrada al viaducto Cesar Gaviria sentido Dosquebradas - Pereira
- Calle 16 con avenida del Ferrocarril, Pereira
- Hospital Mental de Risaralda
- Plaza de Ferias de Cerritos

Ruta 2:

- Museo de Arte de Pereira, 8 am

¹¹ Numeral 3.1.1. Construcción del ciclo.

- Mercasa, 12 pm

De esta manera se garantiza la correcta recopilación de datos y se reduce la pérdida de tiempo en caso de presentarse una repetición obligatoria del recorrido por cuenta de algún fallo en el salvamento de los datos o una desconexión del sistema GPS. En caso tal, solo es cuestión de volver a iniciar desde el lugar donde se realizó la última parada de control. Al finalizar, se pueden unir los otros tres archivos al archivo corregido, manteniendo la validez de la muestra.

No se podrían tener presente en los datos recopilados las detenciones fijas de los recorridos, como pases y zonas de congestión –estas últimas teniendo en cuenta que se realizan las pruebas en horas pico-. Los semáforos no se consideran como detención fija, pues debido a que sus detenciones son aleatorias, se tiene un 50% de posibilidades de que el carro avance sin detenerse en estos puntos y las congestiones no siempre se dan en los mismos puntos ni duran la misma cantidad de tiempo.

Al haber separado y clasificado cada uno de los recorridos, se aplica la ecuación (2) que dará resultados adimensionales. Para cada tramo -de cada recorrido- se encuentra un resultado en cada uno de los parámetros; estos resultados se suman obteniendo un valor, el cual representa a ese recorrido específico. Se compara con los otros de su misma detención, se determina cuál es el de menor valor –este valor es el que determina el tramo que más se acerca a la media de todos los tramos de la misma detención-, y este será el que va a formar parte del ciclo representativo. Se recomienda consultar los anexos A.1., A.2. A.3., A.4. para conocer los valores obtenidos en cada parámetro.

No importa que el ciclo sea construido con tramos de recorridos diferentes; esto garantiza la precisión en la obtención del ciclo porque los tramos se hicieron en los mismos horarios, vehículo y vías.

Al obtener los datos definitivos con los cuatro tramos representativos constituyen el ciclo, se ingresan al programa computacional de control del dinamómetro donde se realizarán las pruebas que permitirán conocer el consumo de combustible e índices de emisiones contaminantes de un vehículo específico.

3.1.1.1. INSTRUMENTACIÓN USADA PARA DETERMINAR EL CICLO DE CONDUCCIÓN

Actualmente, se pueden encontrar diversos equipos en el mercado, sin embargo, los equipos GPS permiten un ahorro muy significativo de costos por su simplicidad en el uso, ahorrando recursos de mano de obra. Además, se eliminan variaciones que afectan considerablemente las mediciones.

El equipo utilizado para conectar el módulo de gases portátil al sistema GPS es el sensor de velocidad marca Sky Trak distribuido por Squibb Taylor (figura 10).

Figura 10. Sensor de velocidad Sky Trak.



Fuente: página web www.squibbtaylor.com

La manera en la que funcionan estos equipos consiste en triangular la posición del dispositivo segundo a segundo. Al conocer su posición actual, calcula el tiempo que le tomó llegar a esta y lo compara con la anterior, midiendo la distancia. Así, encuentra el cambio de posición en el tiempo.

El vehículo utilizado es una camioneta marca Chana, de origen chino. De acuerdo con los datos provistos por el fabricante, este automotor cuenta con una cilindrada de 1000 centímetros cúbicos, 50 caballos de fuerza y 500 kilos de capacidad de carga.

Tabla 5. Especificaciones técnicas del vehículo de pruebas.

Especificaciones técnicas vehículo de pruebas	
Marca	Chana
Referencia	Star Truck
Modelo	2010
Cilindrada	1012 cm ³
Potencia	53 HP
Numero de válvulas	16
Numero de cilindros	4
Alimentación de combustible	Inyección multipunto
Torque	74 N-m @ 4500 rpm

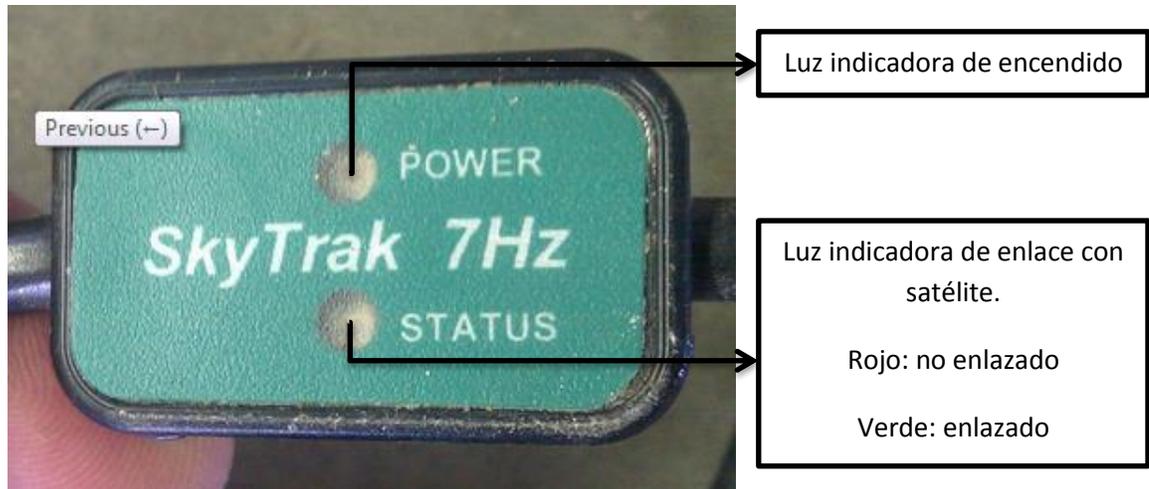
Fuente: Catalogo del distribuidor autorizado para Colombia China Automotriz S.A.

Para utilizar el GPS se requiere tener el vehículo encendido permanentemente durante la toma de muestras, y conectado a una fuente de 110 voltios. Si el vehículo se apaga, solo se guardarán los datos que se hayan obtenido hasta el momento, o puede ocurrir que no guarde ninguno, porque al encender el vehículo nuevamente se crea una sobrecarga de energía por parte de la batería activando el sistema de seguridad del inversor, apagándolo y dando por terminado el proceso de recopilación en el computador de manera abrupta. Al ocurrir esta situación, se debe reiniciar todo el proceso.

Al momento de iniciar el proceso, se debe esperar a que el equipo enlace CON EL satélite; esto se identifica con dos testigos que se iluminan de color verde cuando

se concreta el enlace. Cuando no está enlazado, uno de ellos es de un color diferente. El tiempo que se considera conveniente por parte del fabricante es 120 segundos, pero esto puede variar. Es recomendable esperar tanto como sea necesario.

Figura 11. Indicador de energía y enlace del sensor GPS con satélite.



Fuente: página web www.squibbtaylor.com

3.2. Pruebas en laboratorio

La Universidad Tecnológica de Pereira cuenta con todos los equipos necesarios para desarrollar este tipo de proyectos. Entre estos se equipos se pueden encontrar:

- Dinamómetro de cubos para medir potencia.
- Dinamómetro de rodillos para realizar pruebas de rendimiento de combustible y emisiones.
- Analizadores de gases, móvil para pruebas de emisiones en ruta y estático para el laboratorio.
- Módulo de consumo de combustible.

En la realización de este proyecto de investigación se utilizaron solamente el dinamómetro de rodillos, el analizador de gases móvil, el módulo de combustible para las pruebas de laboratorio.

3.2.1. Descripción de los equipos

3.2.1.1. Dinamómetro de rodillos

Figura 12. Dinamómetro de rodillos



Este dinamómetro permite medir una potencia máxima de 300 HP, y sólo permite su uso para vehículos con tracción 4x2, bien sea delantera o trasera.

Entre sus componentes se encuentran:

- Banco de rodillos, el cual tiene dos motores eléctricos –corriente alterna y de corrientes de Eddy-, los cuales permiten la recuperación de energía para evitar el exceso de consumo de energía innecesario –corriente alterna- y el

frenado del sistema para simular la resistencia de las pendientes en los recorridos – corrientes de Eddy-.

- Módulo de control donde se encuentran las celdas de carga para convertir la señal de torque enviada por el banco de rodillos y convertirla en una señal digital que pueda mostrar la velocidad y el torque en la sala de control.
- Sala de control compuesta por un computador y dos monitores, uno de los cuales será utilizado por el operario que conduce el vehículo durante las pruebas de laboratorio para hacerle seguimiento a la gráfica de pendientes que muestra la velocidad que debe mantenerse. El operario en la sala de control debe visualizar lo mismo que el operario conductor para mantener el buen curso de la prueba.

3.2.1.2. Analizador de gases portátil

Este analizador está compuesto por un módulo ensamblado con sensores de nitrógeno, oxígeno y CO₂. Los datos obtenidos se muestran en un computador portátil incluido en el sistema en el que se puede visualizar los diferentes gases monitoreados. Se conecta a este computador a través de un puerto USB.

Los gases son obtenidos directamente desde el tubo de escape del vehículo, que se conecta con un tubo de efecto Venturi y que, a su vez, lleva conectadas otras mangueras que dirigen una porción muy pequeña de estos gases hacia el módulo analizador, donde sus sensores detectan la proporción de los gases desprendidos durante la combustión, los digitaliza y muestra las cantidades en pantalla para ser leídas por el operario.

Figura 13. Tubo de efecto Venturi para medición de gases de escape.



3.2.2. SIMULACIÓN DEL CICLO PARA PRUEBAS DE EMISIONES

Después de generar los ciclos que se van a utilizar en el análisis de emisiones en laboratorio, se procede a la preparación de los equipos de medición de emisiones como se explica a continuación:

1. Se conectan las mangueras necesarias al equipo analizador de gases.
2. Se enciende el compresor que lleva el aire para bloquear los rodillos del dinamómetro y así montar el vehículo.
3. El vehículo debe dejarse rodar libremente por unos segundos para alinear los ejes de las ruedas hasta que queden paralelos a los ejes de los rodillos.
4. Llenar el tanque de combustible del vehículo.
5. Amarrar con riatas de seguridad el vehículo a través de sus anclajes de arrastre, generalmente ubicados en la parte trasera.
6. Se enciende la unidad de control del dinamómetro junto con el computador que va a recopilar los datos a través del programa simulador del ciclo.
7. Ingresar los datos en programa de control del dinamómetro de rodillos, el cual toma los datos obtenidos y los agrupa en orden cronológico, otorgándole un dato de velocidad tomado a cada segundo recorrido en el ciclo.

8. Posteriormente, se instalan y encienden los sistemas de refrigeración del laboratorio y se conectan las tuberías y mangueras que se acoplan al exhosto. En esta instalación va incluido el tubo Venturi que permite la lectura de la velocidad de los gases por parte del analizador.
9. Se debe realizar una comprobación de que los puertos estén funcionando correctamente a través del programa DCon Utility, seleccionando el puerto COM 3 para realizar la prueba.
10. Se procede a cargar el ciclo en el programa de control del dinamómetro, copiando y pegando los datos obtenidos en la tabla de Excel a un archivo “bloc de notas” que servirá como archivo fuente de los datos a cargar en el dinamómetro. Se debe esperar unos minutos hasta que aparezca la gráfica de color rojo en la parte baja de la pantalla, lo que indica que ya se puede correr el ciclo (figura 11). Se recomienda no utilizar el computador del dinamómetro ni el del analizador mientras se hacen las pruebas ya que se bloquean y es necesario reiniciar el proceso.

Figura 11. Gráfica de seguimiento del ciclo en dinamómetro.



11. Al cargar los ciclos en la gráfica roja se procede a salir del panel de ayuda y se presiona el botón de iniciar ciclo de conducción donde se deberá guardar a un archivo de Excel generado automáticamente. Se debe tener en cuenta que al oprimir OK se inicia el ciclo inmediatamente, por lo que es necesario que hayan dos personas encargadas de la simulación: un técnico operario encargado de conducir el vehículo a través del ciclo junto con otro operario que monitoree los computadores durante la simulación.

3.2.3. Análisis de datos recopilados

Los datos arrojados por las pruebas permiten determinar el consumo de combustible y cantidad de gases de escape representados en gramos por kilómetro recorrido, y fue necesario aplicar el método estadístico de T-student*, debido a la cantidad tan pequeña de datos recopilados: 4 mediciones para cada uno de los cuatro recorridos, dando un total de 16 datos sujetos a la aplicación del método.

4. RESULTADOS

4.1. Pruebas en carretera

4.1.1. Datos obtenidos en pruebas de ruta

Todo lo explicado hasta el momento permitió generar 4 ciclos que corresponden a cada uno de los recorridos en los horarios estipulados. No se generó un ciclo único debido a que no corresponden a condiciones exactamente iguales de medición.

De acuerdo con las siguientes gráficas, se pudieron observar los diferentes periodos de tiempo e intervalos de velocidad resultantes durante las pruebas, los cuales nunca superaron los límites establecidos en legislación de tránsito colombiana, otorgándole la validez a las pruebas realizadas. También los tiempos de ralentí, aceleración positiva y recorrido, distancias recorridas en cada prueba y aceleración máxima positiva y promedio positiva, y número de paradas.

Cabe aclarar que las gráficas de los perfiles de velocidad denotan pendientes muy pronunciadas debido a que su escala es demasiado pequeña en comparación con el ciclo real.

Ruta 1, 8 a.m.

Tabla 6. Parámetros ciclo La Romelia – La Virginia 8 am.

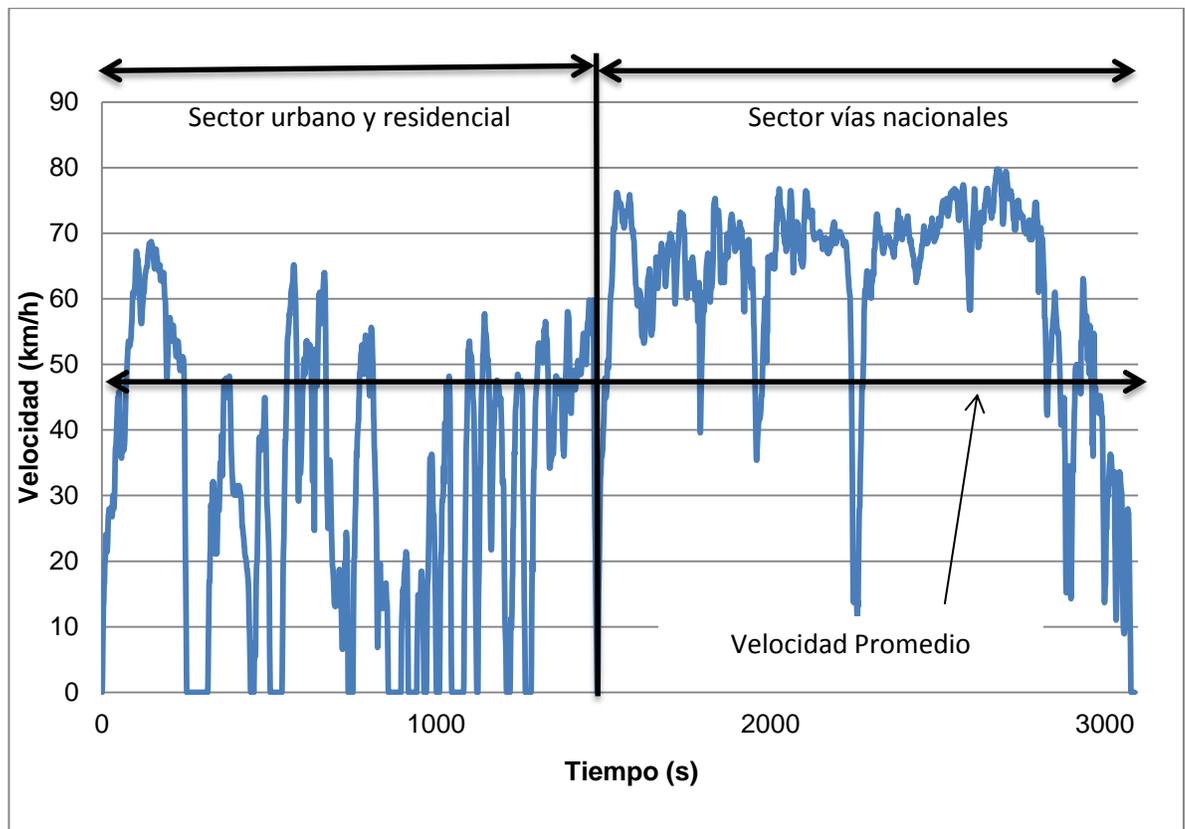
Parámetros ciclo La Virginia 8 am	
Velocidades promedio (km/h)	47,05
Velocidades Máximas (km/h)	79,74
Tiempos de Ralentí (s)	284
Tiempo recorrido (s)	3089
Distancia Recorrida (km)	44,9
Aceleraciones Promedio Positivas	1,39
Aceleración Positiva Máxima	17,25
Tiempo con Aceleración Positiva (s)	1315
Número de paradas	16

En la figura 12 se puede observar el perfil de velocidad obtenido para el recorrido de La Virginia a las 8 am. La línea vertical que divide la gráfica señala el punto donde se hace el cambio de vía urbana a vía nacional, y que se da en el semáforo de Turín en la ciudad de Pereira. Por esto se ve una pendiente negativa hasta llegar a cero en la velocidad, indicando una parada.

Al lado derecho de la línea vertical se puede observar que la gráfica es más fluida y la velocidad nunca alcanza el cero puesto que no hay paradas a partir de Turín hasta el parque central del municipio de La Virginia.

Allí se observa que el máximo absoluto se obtiene en los 80 km/h y se da en la vía nacional, más exactamente entre el sector de cerritos y el municipio de La Virginia.

Figura 12. Perfil velocidad vs tiempo de ruta La Romelia – La Virginia 8 am.



Ruta 1, 12 m.

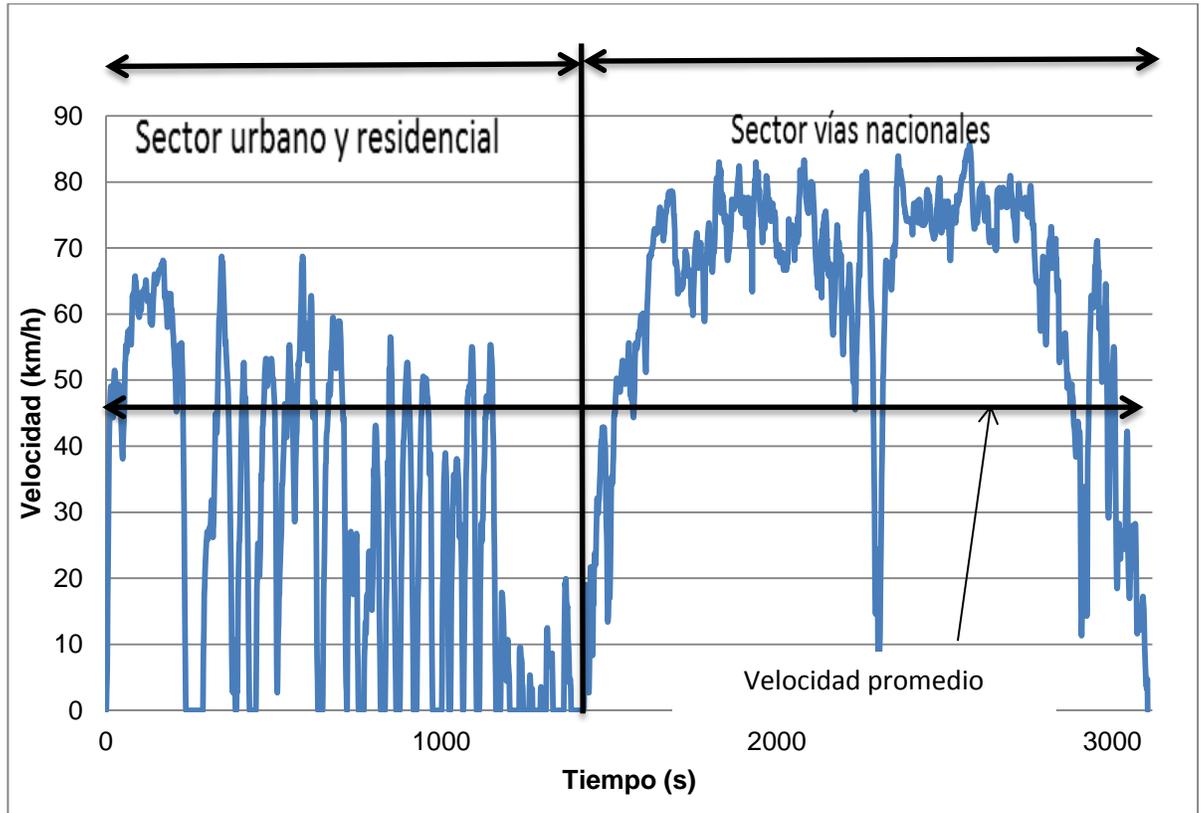
Tabla 7. Parámetros ciclo La Romelia – La Virginia 12 pm.

Parámetros La Virginia 12 pm	
Velocidades Promedio (km/h)	46,80
Velocidades Máximas (km/h)	85,69
Tiempo de Ralentí (s)	366
Promedio tiempos recorridos (s)	3108
Distancia Recorrida (km)	44,9
Aceleraciones Promedio Positivas	1,55
Aceleración Positiva Máxima	18,15
Tiempos con Aceleración Positiva (s)	1305
Número de paradas	22

En la figura 13 se pueden observar características similares a la gráfica anteriormente explicada, y sus diferencia radican en que se nota una reducción importante de la velocidad antes de llegar a la línea que divide el sector urbano de las vías nacionales. Esto se debe a que fue realizado en una hora pico y la dirección de recorrido fue en la misma dirección en la que se dirigían los vehículos a la hora del descanso.

En general, la gráfica de 8 am y la de 12 pm muestran muchas similitudes en ambos tramos, incluso en la caída de velocidad en las vías nacionales, puesto que en este punto se debe reducir considerablemente la marcha por el gran resalto que se encuentra en el sector de Cerritos y que demarca la vía de entrada hacia el municipio de La Virginia.

Figura 13. Perfil velocidad vs tiempo de ruta La Romelia – La Virginia 12 pm.



Ruta 2, 8 a.m.

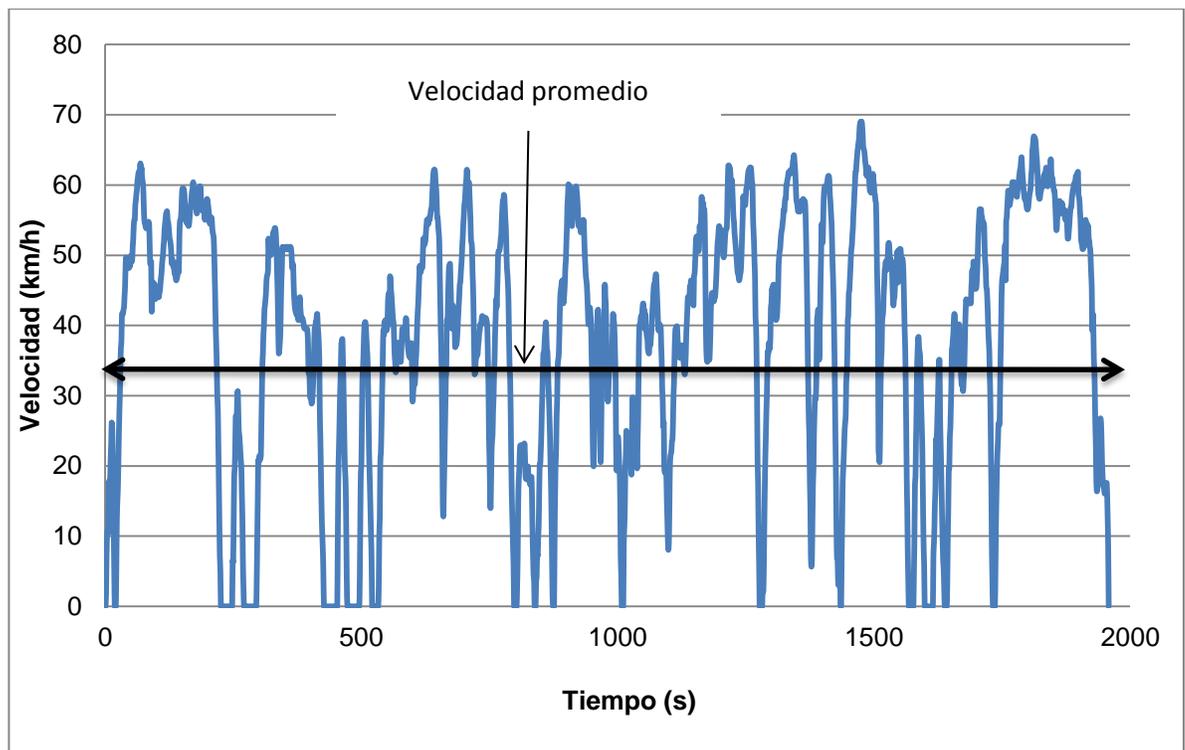
Tabla 8. Parámetros ciclo Mercasa 8 am.

Parámetros ciclo Mercasa 8 am	
Velocidad Promedio (km/h)	37,30
Velocidad máxima promedio (km/h)	69,03
Tiempo en Ralentí (s)	212
Tiempo Promedio recorrido (s)	1961
Distancia Recorrida (km)	18,6
Aceleraciones Promedio Positivas	1,88
Aceleraciones Positivas Máximas	38,98
Tiempo con Aceleración Máxima (s)	864
Número de paradas	19

La figura 14 muestra el perfil extraído a través de los datos recopilados en la ruta Mercasa de las 8 am. Su duración es un tercio menor a la obtenida en La Virginia.

Se pueden notar varios picos y valles, estos últimos creados por las paradas de semáforos en la Avenida de Las Américas, permitiendo señalar que este es un ciclo totalmente urbano, teniendo en cuenta que la velocidad máxima obtenida llega casi hasta los 70 km/h, pero solo dura unos cuantos segundos, los que podría indicar que se trate de un adelantamiento a otro vehículo y se da una sola vez en todo el recorrido.

Figura 14. Perfil velocidad vs tiempo de ruta Mercasa 8 am.



Ruta 2, 12 m.

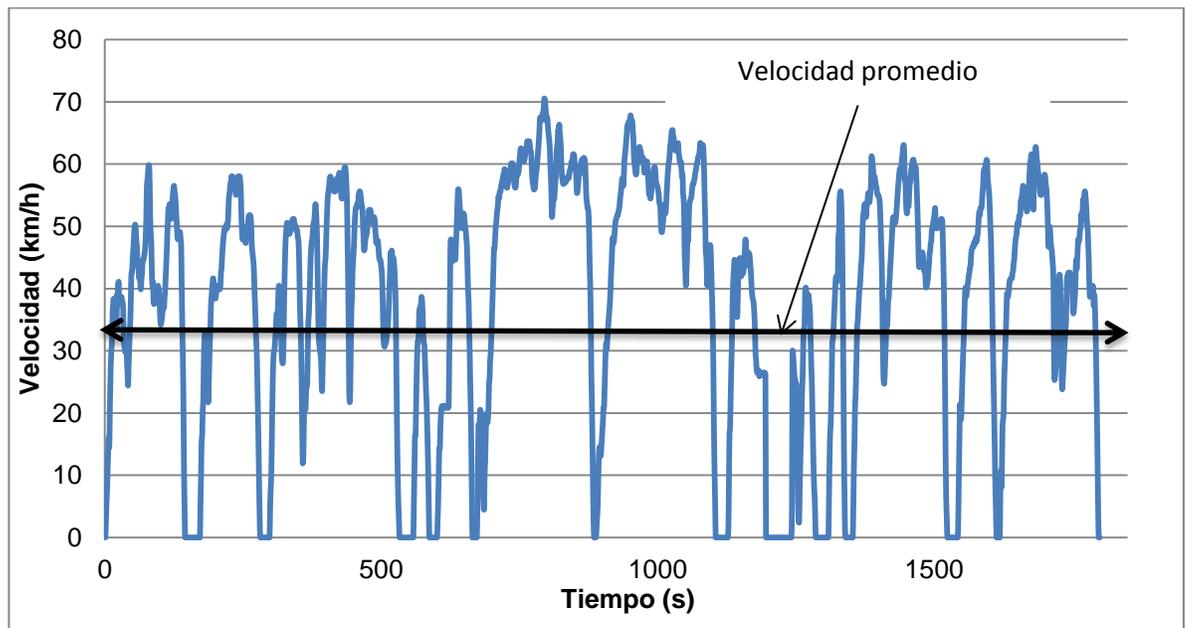
Tabla 9. Parámetros ciclo Mercasa 12 pm

Parámetros ciclo Mercasa 12 pm	
Velocidad Promedio (km/h)	38,14
Velocidad máxima promedio (km/h)	70,52

Parámetros ciclo Mercasa 12 pm	
Tiempo en Ralentí (s)	242
Tiempo Promedio recorrido (s)	1802
Distancia Recorrida (km)	18,6
Aceleraciones Promedio Positivas	1,70
Aceleraciones Positivas Máximas	29,75
Tiempo con Aceleración Máxima (s)	798
Número de paradas	14

Este perfil se obtuvo haciendo el recorrido de manera inversa al de las 8 am, sin embargo su grafica no es un “espejo” de este, pues son condiciones de conducción diferentes. Sin embargo, guardan similitud en el sentido de que son ciclos con características urbanas ya que este también tiene muchos picos y valles que indican aceleraciones más grandes que los dos ciclos de La Virginia, como lo demuestran sus pendientes y variaciones en su velocidad en los tramos que hay entre paradas. También tiene una duración de un tercio del recorrido a La Virginia.

Figura 15. Perfil velocidad vs tiempo de ruta Mercas 12 pm.



4.2. Pruebas en laboratorio

Para tener referencia de los valores aceptados de emisiones en las pruebas de laboratorio se tomó la norma EURO II, ya que es la aceptada para Colombia. Si bien esta norma no se aplica para medir o regular emisiones de los vehículos que circulan en el país, sí es usada para permitir el ingreso de vehículos nuevos.

EURO II propone como límites máximos los siguientes valores de acuerdo al gas emitido:

Tabla 10. Valores aceptados para la norma EURO II.

CO (g/km)	HC + NOx (g/km)
2,20	0,50

Debido a que Euro II no tiene valores de referencia para HC, NOx y PM, se hace necesario tomar como referencia los valores establecidos en EURO III:

Tabla 11. Valores aceptados para la norma EURO III.

CO (g/km)	HC (g/km)	NOx (g/km)
2,30	0,20	0,15

Se puede observar que las pruebas de laboratorio arrojaron resultados que cumplen con cualquiera de estas dos normas, dejando un gran margen en comparación con los valores establecidos. No obstante, se debe tener en cuenta que las pruebas fueron realizadas en laboratorio, lo que permite reducir los factores que afectan la conducción real, como lo son las pendientes, variaciones de las vías, resistencia al viento, entre otras.

Los efectos de las pendientes pueden medirse con el dinamómetro de rodillos pero no fueron tenidas en cuenta para la realización de este proyecto por la falta de recursos tecnológicos para medirlas.

En los cuatro recorridos se pudieron observar grandes diferencias entre la cantidad de gases emitidos durante cada trayecto. Estos intervalos pueden tener límites negativos, pues no representan un valor real, sino de cuanto puede ser el rango de aceptación para la medición en esos mismos trayectos.

De los cálculos realizados, y comparándolos con las tablas anteriores, se puede determinar que los valores están dentro de los rangos de emisión permitidos por EURO II y EURO III.

Tomando como presente que las pruebas no fueron realizadas con los vehículos en rutas reales, sino en condiciones de laboratorio, se puede evidenciar la causa de la diferencia de valores y que valida los resultados obtenidos pues están por debajo de los límites establecidos en las normas.

Las siguientes tablas permiten visualizar los valores de emisiones obtenidos durante las simulaciones de los ciclos en el laboratorio para los cuatro gases a los que es posible medir sus niveles de emisión en el Laboratorio –CO₂, CO, HC y NO_x. Todos estos en gramos emitidos por kilómetro recorrido.

Se tomaron cuatro valores de emisiones que, al ser tratados por medio del método de t-Student, entregaron un valor representativo de las emisiones. Allí se pueden observar que los valores de gases emitidos en laboratorio no superan los niveles establecidos por las norma EURO II y EURO III. Euro II es la que se ha tomado como referencia en la normatividad de Colombia, sólo para la aceptación de vehículos nuevos que ingresen al mercado de automotores. Sin embargo, se utiliza esta referencia para darle apoyo técnico a la revisión de resultados de este proyecto. Esto se concluye gracias a los valores promedio de las cuatro muestras de cada gas.

Los valores promedio son una aproximación a la media representativa de cada uno de los gases y es el valor que se toma para comparar con los niveles

permitidos en las normas EURO II y EURO III. Como se dijo anteriormente, estos valores no deben superar los permitidos en estas normas. Para su aceptación, deben estar iguales o por debajo de estos estándares.

En algunos valores se encuentran números negativos, lo que significa que el rango mínimo que se permite para esa emisión es el valor absoluto por debajo del valor aprobado.

Se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 12. Valores obtenidos en pruebas de emisiones para la ruta Mercasa 8 am.

Promedios Mercasa 8 am				
No. De datos	CO₂ (g/km)	CO (g/km)	HC (g/km)	NOx (g/km)
1	110,82	2,28	0,41	1,93
2	167,15	0,45	0,09	0,04
3	165,88	3,37	0,21	1,13
4	166,33	3,53	0,20	2,04
Promedio	152,55	2,40	0,23	1,28
Desviación estándar	27,81	1,41	0,13	0,92
Menor valor aceptado	108,25	0,15	0,02	-0,17
mayor valor aceptado	196,84	4,66	0,44	2,75

Tabla 13. Valores obtenidos en pruebas de emisiones para la ruta Mercasa 12 pm.

Promedios Mercasa 12 pm				
No. De datos	CO₂ (g/km)	CO (g/km)	HC (g/km)	NOx (g/km)
1	36,33	0,97	0,19	0,16
2	27,97	0,71	0,16	0,06
3	27,16	0,34	0,05	0,02
4	17,85	0,15	0,04	0,08
Promedio	27,34	0,54	0,11	0,08
Desviación estándar	7,55	0,36	0,075	0,06
Menor valor aceptado	15,31	-0,03	-0,006	-0,01
mayor valor aceptado	39,35	1,12	0,23	0,17

Tabla 14. Valores obtenidos en pruebas de emisiones para la ruta La Virginia 8 am.

Promedios La Virginia 8 am				
No. De datos	CO₂ (g/km)	CO (g/km)	HC (g/km)	NOx (g/km)
1	76,43	1,75	0,09	1,57
2	104,84	2,88	0,24	0,03
3	106,06	3,37	0,55	0,80
4	98,91	0,22	0,02	0,20
Promedio	96,56	2,05	0,22	0,65
Desviación estándar	13,77	1,39	0,23	0,69
Menor valor aceptado	74,64	-0,16	-0,15	-0,45
mayor valor aceptado	118,45	4,28	0,60	1,76

Tabla 15. Valores obtenidos en pruebas de emisiones para la ruta La Virginia 12 pm.

Promedios La Virginia 12 pm				
No. De datos	CO₂ (g/km)	CO (g/km)	HC (g/km)	NOx (g/km)
1	108,82	0,26	0,03	0,01
2	105,32	0,03	0,007	0,06
3	103,29	2,83	0,24	0,03
4	102,29	2,88	0,08	1,57
Promedio	104,93	1,50	0,09	0,42
Desviación estándar	2,88	1,56	0,10	0,76
Menor valor aceptado	100,35	-0,98	-0,07	-0,80
mayor valor aceptado	109,51	3,99	0,25	1,64

5. CONCLUSIONES

Esta investigación permitió la generación de cuatro ciclos de conducción apoyándose en la metodología Aplicada en la ciudad de Naucalpan, México. Esta metodología ya había sido utilizada anteriormente para determinar factores de emisión para la ciudad de Pereira en el año 2007, y ha sido validada con este proyecto, teniendo en cuenta que se utilizaron equipos más precisos en sus mediciones y que permitían la reducción de pérdidas de señal por las condiciones de las rutas. Además, no solo fue aplicada a la ciudad de Pereira, sino al Área Metropolitana Centro Occidente, que comprende los municipios de Pereira, Dosquebradas y La Virginia, en el Departamento de Risaralda.

Este tipo de proyectos se realizaron en diferentes lugares del mundo, siendo muy utilizados en países desarrollados, principalmente, así como en países emergentes, lo que permitió hacer consultas de bibliografía muy específica, para tener una mejor selección de las rutas de tal manera que toda la región se viera afectada positivamente por esta investigación. Además, se contó con importantes recursos obtenidos gracias a la Vicerrectoría de Investigaciones, Innovación y Extensión, el Laboratorio de Pruebas Dinámicas Automotrices, ambos de la Universidad Tecnológica de Pereira y la Corporación Autónoma Regional de Risaralda, lo que permitió crear lazos entre la academia y las entidades gubernamentales para tener un soporte técnico con el cual se pueda regular las emisiones por fuentes móviles, generar inventarios de emisiones para la región y allanando el camino para que Pereira pueda ser vista como ciudad amigable con el ambiente.

En las rutas establecidas se tomó en cuenta que estas representaran lo mejor posible las condiciones de conducción de la región y que las vías cubrieran los tres tipos de vía que se reconocen en Colombia: residencial, urbano, vías nacionales.

En condiciones de laboratorio se pudieron reproducir las condiciones de conducción de las rutas, con lo que se pudo obtener un resultado aproximado de las emisiones generadas en estos recorridos. Teniendo en cuenta que los factores que influyen en la conducción se reducen en un ambiente de conducción controlado, los valores de estas emisiones pueden estar por debajo de los establecidos como permitidos.

En cuanto a las emisiones generadas en las pruebas de laboratorio se pudo encontrar que el recorrido donde menos contaminación se generó fue el de la Ruta 2 a las 12 m. Allí, el valor de CO₂ fue de 27 g/km en promedio, mientras que el mayor fue en esta misma ruta pero en el horario de las 8 a.m.

Estas diferencias corresponden a la gran cantidad de vehículos que se movilizan por esta ruta en dicho horario a causa de que gran parte e la población se transporta a sus lugares de trabajo y estudio.

6. RECOMENDACIONES

Se recomienda extender esta metodología de investigación a otras regiones del territorio colombiano. Para esto, se sugiere utilizar sistemas de medición alternativos con el fin de poder tener margen de comparación. Ya que en este proyecto se hicieron las mediciones a través de un sistema GPS, una de las alternativas sería el sistema ruso GLONASS.

También se hace necesario difundir los resultados de este proyecto a nivel nacional con el fin de sustentar y confirmar la metodología utilizada para que sea implementada en otras regiones, como las ciudades principales con altos índices movilidad vehicular.

Lo anterior no debería implementarse solamente a un vehículo, como en este caso, sino a una muestra más grande para obtener resultados más precisos y que puedan ser usados como referencia para las demás regiones interesadas en realizar investigaciones similares.

Por otra parte, es también recomendable implementar actualizaciones del ciclo para estar al día de los cambios que puedan sufrir las rutas así como la tecnología de los dispositivos de medición.

Los resultados obtenidos deben ser tenidos en cuenta como un primer paso para generar un inventario de emisiones en el Área Metropolitana Centro Occidente. También se debe generar el mismo resultado en la región donde sea implementada esta metodología.

Anexo A.1

La Romelia - La Virginia, 8 am.	
Velocidades promedio (km/h)	47,0582705
Velocidades Máximas (km/h)	79,745689
Tiempos de Ralentí (s)	284
Tiempos Promedio (s)	3089
Distancia Recorrida (km)	44,9
Aceleraciones Promedio Positivas (km/h^2)	1,39834395
Aceleración Positiva Máxima	17,258394
Tiempo con Aceleración Positiva (s)	1315
Número de paradas	16
Y velocidad promedio	1,23423972
Y velocidades máximas	-1,23114775
Y tiempos de ralentí	0,6
Y tiempo de recorrido	-118,25
Y distancia recorrida	-
Y aceleraciones positivas promedio	-0,0289418
Y aceleración positiva máxima	2,3097975
Y tiempo con aceleración positiva	-39,7
SUMATORIA DE LOS Y	-155,066052
Desviación estándar	23,8692509
Coefficiente de variación	0,50722754

Anexo A.2

La Romelia - La Virginia, 12 pm.	
Velocidades promedio (km/h)	46,8074136
Velocidades Máximas (km/h)	85,696861
Tiempos de Ralentí (s)	366
Tiempos Promedio (s)	3108
Distancia Recorrida (km)	44,9
Aceleraciones Promedio Positivas (km/h²)	1,55733702
Aceleración Positiva Máxima	18,151072
Tiempo con Aceleración Positiva (s)	1305
Número de paradas	22
Y velocidad promedio	0,47094502
Y velocidades máximas	0,05207344
Y tiempos de ralentí	7,2375
Y tiempo de recorrido	-8,55
Y distancia recorrida	44,9
Y aceleraciones positivas promedio	0,08000785
Y aceleración positiva máxima	0,44633891
Y tiempo con aceleración positiva	32,75
SUMATORIA DE LOS Y	77,3868652
Desviación estándar	27,5049384
Coefficiente de variación	0,58761927

Anexo A.3.

Mercasa 8 am.	
Velocidades promedio (km/h)	37,3037797
Velocidades Máximas (km/h)	69,033577
Tiempos de Ralentí (s)	212
Tiempos Promedio (s)	1961
Distancia Recorrida (km)	18,6
Aceleraciones Promedio Positivas (km/h²)	1,88637627
Aceleración Positiva Máxima	38,980167
Tiempo con Aceleración Positiva (s)	864
Número de paradas	19
Y velocidad promedio	0,81597859
Y velocidades máximas	-0,4017046
Y tiempos de ralentí	-50,4
Y tiempo de recorrido	-36,3
Y distancia recorrida	18,6
Y aceleraciones positivas promedio	0,1060782
Y aceleración positiva máxima	-7,28646525
Y tiempo con aceleración positiva	29,1
SUMATORIA DE LOS Y	-45,7661131
Desviación estándar	19,6034737
Coefficiente de variación	0,52550905

Anexo A.4.

Mercasa 12 pm.	
Velocidades promedio (km/h)	38,1417316
Velocidades Máximas (km/h)	70,52137
Tiempos de Ralentí (s)	242
Tiempos Promedio (s)	1802
Distancia Recorrida (km)	18,6
Aceleraciones Promedio Positivas (km/h²)	1,70182598
Aceleración Positiva Máxima	29,755855
Tiempo con Aceleración Positiva (s)	798
Número de paradas	14
Y velocidad promedio	0,76715616
Y velocidades máximas	-0,85920085
Y tiempos de ralentí	-12,525
Y tiempo de recorrido	-62,85
Y distancia recorrida	18,6
Y aceleraciones positivas promedio	-0,12473278
Y aceleración positiva máxima	-17,886986
Y tiempo con aceleración positiva	9,45
SUMATORIA DE LOS Y	-65,4287635
Desviación estándar	20,4167095
Coeficiente de variación	0,53528533

BIBLIOGRAFÍA

AGENCIA DE PROTECCIÓN AMBIENTAL. Federal Test Procedure FTP – 75. Washington D.C. Estados Unidos de América. Octubre 22, 1996.

ANDRE, Michel. Caracterización del tráfico para la estimación emisiones contaminantes. Instituto Nacional de Investigación para la Seguridad del Transporte – ARTEMIS. Francia. 2006.

BARLOW, TJ; LATHAM, S; MCRAE, I S; BOULTER, PJ. A reference book of driving cycles for use in measurement of road vehicle emissions, versión 3. Reporte de proyecto. Reino Unido; Transportation Research Laboratory. 2009.

GONZALEZ, Alberto. Ciclo de conducción de Vigo para vehículos eléctricos. Universidad de Vigo. Vigo, España. 2006.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS. Normas colombianas para la presentación de trabajos escritos NTC-1486. Santa Fe de Bogotá D.C. ICONTEC. 2010.

MARTINEZ BECARDINO, Ciro. Estadística básica aplicada. ECOE Ediciones. Santa Fe de Bogotá. 2006.

RESTREPO VICTORIA, Álvaro Hernán; CARRANZA SANCHEZ, Yamid Alberto; TIBAQUIRÁ GIRALDO, Juan Esteban. Diseño y aplicación de una metodología para determinar ciclos de conducción vehicular en la ciudad de Pereira. Universidad Tecnológica de Pereira. Pereira, 2007.

RODRÍGUEZ, P.A.; BEHRENTZ, E. Actualización del inventario de emisiones de fuentes móviles para la ciudad de Bogotá a través de mediciones directas. Universidad De Los Andes. Bogotá, Colombia. 2009

TUNG, H.Y; HUNG, W.T.; CHEUNG, C.S. Desarrollo de un ciclo de conducción para Hong Kong. Universidad Politécnica de Hong Kong. Departamento de Ingeniería Civil y Estructural y Departamento de Ingeniería Mecánica. Hong Kong, 1999.

VELEZ AGUILERA, Alfredo. Determinación de un ciclo típico de conducción en el Municipio de Naucalpan. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey de México. Facultad de Ingeniería Automotriz Área de desarrollo sostenible. Toluca, México. 2005.

WALPOLE, Ronald E.; MYERS, Raymond H.; MYERS, Sharon L.; YE, Keying. Probabilidad y Estadística para ingeniería y ciencias. Pearson. 9ª edición. México. 2012.