

*PROTOCOLO PARA MEDICIÓN DE EMISIONES GASEOSAS, MATERIAL  
PARTICULADO Y DETERMINACIÓN DE EFICIENCIA ENERGÉTICA EN  
VEHÍCULOS DEL SITP DE LA CIUDAD DE BOGOTÁ DC*

**SECRETARÍA DISTRITAL DE AMBIENTE**  
DIRECCIÓN DE CONTROL AMBIENTAL  
SUBDIRECCIÓN DE CALIDAD DE AIRE AUDITIVA Y VISUAL

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA**  
SEDE BOGOTÁ  
GIBEPMA - GICA

Bogotá D.C., Colombia.  
2013

## CONTENIDO

<b>CONTENIDO</b>	<b>2</b>
<b>LISTA DE TABLAS</b>	<b>4</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b>5</b>
<b>LISTA DE ANEXOS</b>	<b>6</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>7</b>
<b>1. PROTOCOLO PARA LA MEDICIÓN DE FACTORES DE EMISIÓN Y EFICIENCIA ENERGÉTICA</b>	<b>9</b>
1.1 CONSIDERACIONES PARA MEDICIONES EN RUTA .....	9
1.2 CONSIDERACIONES PARA MEDICIONES EN BANCO DINAMOMÉTRICO .....	10
1.3 PROCEDIMIENTOS PARA LA EJECUCIÓN DE LAS PRUEBAS .....	12
1.3.1 CONDICIONES DE PRUEBA.....	12
1.3.2 CONDICIONES DEL VEHÍCULO .....	12
1.3.3 CONDICIONES DEL RESS (SÓLO PARA VEHÍCULOS HÍBRIDOS) .....	13
1.3.4 CONDICIONES DE OPERACIÓN DEL DINAMÓMETRO .....	14
1.3.5 CORRIDAS DE PRÁCTICA .....	15
<b>2. METODOLOGÍA</b>	<b>16</b>
2.1 DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS DE MEDICIÓN Y SISTEMAS DE MUESTREO .....	17
2.1.1 VEHÍCULOS TIPO PADRÓN DE SERVICIO ZONAL.....	18
2.1.2 VEHÍCULOS ARTICULADOS Y BIARTICULADOS DE SERVICIO TRONCAL .....	19
2.1.3 VEHÍCULO DE MENOR TIPOLOGÍA PERTENECIENTE AL SERVICIO ZONAL .....	19
2.2 DESCRIPCIÓN DE RUTAS PARA PRUEBAS DE CONSUMO DE COMBUSTIBLE Y EMISIONES.....	20
2.2.1 VEHÍCULOS TIPO PADRÓN DE SERVICIO ZONAL.....	20
• RUTA DEFINIDA PARA DETERMINAR EL CONSUMO DE COMBUSTIBLE .....	20
• RUTA DEFINIDA PARA MEDIR EMISIONES .....	24
2.2.2 VEHÍCULOS ARTICULADOS Y BIARTICULADOS DE SERVICIO TRONCAL .....	28
• RUTA DEFINIDA PARA DETERMINAR EL CONSUMO DE COMBUSTIBLE .....	28
• RUTA DEFINIDA PARA MEDIR EMISIONES .....	28
2.2.3 VEHÍCULO DE MENOR TIPOLOGÍA PERTENECIENTE AL SERVICIO ZONAL .....	32
• RUTA DEFINIDA PARA DETERMINAR EL CONSUMO DE COMBUSTIBLE .....	32
• RUTA DEFINIDA PARA MEDIR EMISIONES .....	32
2.3 CARACTERÍSTICAS DE MANEJO .....	35
2.4 MEDICIÓN DEL CONSUMO DE COMBUSTIBLE POR PASAJERO .....	35
2.5 MEDICIÓN DEL CONSUMO DE COMBUSTIBLE POR TIPOLOGÍA .....	35
2.5.1 VEHÍCULOS TIPO PADRÓN DE SERVICIO ZONAL.....	35



• MEDICIONES EN RUTA.....	35
• BALANCE DE CARBONO .....	35
2.5.2 VEHÍCULOS ARTICULADOS Y BIARTICULADOS DEL SERVICIO TRONCAL .....	36
2.5.3 VEHÍCULO DE MENOR TIPOLOGÍA PERTENECIENTE AL SERVICIO ZONAL .....	36
<b>2.6 DETERMINACIÓN DE LA CARGA EN EL DINAMÓMETRO .....</b>	<b>36</b>
<b>2.7 ADQUISICIÓN DE DATOS .....</b>	<b>37</b>
2.7.1 PRE-PROCESAMIENTO.....	37
2.7.2 PROCESAMIENTO .....	37
<b>2.1 CÁLCULO DE CONSUMO DE COMBUSTIBLE POR BALANCE DE CARBONO .....</b>	<b>37</b>
<b>2.2 CÁLCULO EQUIVALENCIA ENERGÉTICA ENTRE TECNOLOGÍAS .....</b>	<b>40</b>
2.2.1 ENTRE VEHÍCULO HÍBRIDO-DIESEL Y DIESEL CONVENCIONAL.....	40



ALCALDÍA MAYOR  
DE BOGOTÁ D.C.  
SECRETARÍA DE AMBIENTE

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Equipos de análisis de gases de escape, de medición de material particulado y de flujo de gases de escape	18
Tabla 2. Descripción de las paradas durante los recorridos de la ruta completa	27
Tabla 3. Descripción de las paradas en los recorridos en ruta efectuados por los articulados y biarticulados objeto de estudio.	30
Tabla 4. Unidades de los reportes suministrados por los analizadores	37
Tabla 5. Fracciones de masa de carbón en algunos combustibles	40

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de actividades durante la medición de consumo de combustible durante la ruta completa	16
Figura 2. Esquema actividades durante la medición de emisiones en ruta recortada	17
Figura 3. Esquema actividades durante la medición de consumo de combustible y emisiones en el dinamómetro	17
Figura 4. Ciclo de conducción para el servicio zonal tipo padrón de Bogotá	19
Figura 5. Ciclo de conducción para el servicio troncal de Bogotá	19
Figura 6. Ciclo de conducción para el servicio SITP zonal de Bogotá	19
Figura 7: Recorrido de la ruta para evaluación de consumo de combustible de buses padrón.	22
Figura 8. Perfil de elevación de la ruta para las pruebas de consumo de combustible.	23
Figura 9. Recorrido ruta bus padrón para medición de emisiones	25
Figura 10. Perfil de elevación ruta bus padrón para medición de emisiones	26
Figura 11. Recorrido y paradas realizadas para medición de emisiones en vehículos articulados de servicio troncal.	29
Figura 12. Perfil de elevación de la ruta para la evaluación de emisiones en buses del sistema Transmilenio	31
Figura 13. Ruta de pruebas para vehículo de menor tipología perteneciente al servicio zonal	33
Figura 14. Perfil de elevación para ruta del vehículo de menor tipología perteneciente al servicio zonal	33
Figura 15. Esquema de conexión del tanque auxiliar aforado de combustible.	36
Figura 16. Esquema de actividades efectuadas en el procesamiento de datos	39



ALCALDÍA MAYOR  
DE BOGOTÁ D.C.  
SECRETARÍA DE AMBIENTE

## LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Bases de datos para la construcción de los ciclos de conducción (Copia digital).



ALCALDÍA MAYOR  
DE BOGOTÁ D.C.  
SECRETARÍA DE AMBIENTE

## INTRODUCCIÓN

Se presentan los protocolos para realizar las pruebas en ruta y dinamómetro de chasis para evaluar la eficiencia energética, el consumo de combustible y las emisiones de contaminantes atmosféricos en vehículos que están siendo o serán utilizados en el Sistema Integrado de Transporte Público de Bogotá - SITP. Estos protocolos se han aplicado en buses tipo padrón, híbridos en paralelo con motores diesel y eléctrico, con recuperación de energía durante el frenado y durante la marcha estable. En vehículos que cumplen con la normatividad ambiental Euro IV y V y están equipados con un sistema de tratamiento de gases por reducción catalítica selectiva (en inglés, SCR -*Selective Catalytic Reduction*-). Adicionalmente, han sido aplicados en vehículos con motor diesel convencional. Que cumplen la norma ambiental Euro V con motor diesel y sistema de tratamiento de gases de escape SCR ó la norma ambiental Euro IV con motor diesel y sistema de tratamiento de gases de escape SCR. Otros que cumplen con la norma ambiental Euro IV y un diseño de motor que incluye turbo cargador de geometría variable y recirculación de gases de escape (en inglés, EGR- *Exhaust Gas Recirculation*-). Finalmente, se han evaluado vehículos con motor dedicado a gas natural que cumplen con la norma ambiental Euro V- EEV.

Por otra parte, se han evaluado buses de menor tipología y que hacen parte del componente zonal de SITP, el cual incluye buses con capacidades entre diecinueve (19) y sesenta (60) pasajeros de diferentes configuraciones, cargados al 70% de su capacidad nominal de carga. Estos corresponden a vehículos de tecnología Euro IV y motor diesel con sistema de inyección directa de combustible "*Common Rail*".

Finalmente se han evaluado vehículos de transporte masivo como articulado y biarticulado, con tecnologías en el marco de normatividad Euro IV y Euro V.

La ejecución del presente protocolo contempla la evaluación de los vehículos en ruta bajo condiciones reales de tráfico, cargados al 70% de su capacidad. Se circula por una ruta predefinida con simulación de las detenciones en paraderos definidos. Para el caso de los vehículos articulados se definió una ruta desde el portal de la Calle 80 hasta el portal de Suba, haciendo paradas intercaladas en las estaciones del sistema Transmilenio, circulando por el carril exclusivo para este tipo de vehículos y con una velocidad máxima regulada de 60 km/h. La carga de los vehículos articulados correspondió al 70% de la capacidad máxima de pasajeros para cada vehículo, con un peso promedio de 68 kg por pasajero.

Se debe realizar la medición y el registro en tiempo real de las emisiones de material particulado, hidrocarburos totales, monóxido de carbono, dióxido de carbono, óxidos de nitrógeno, consumo de combustible, amperaje desde y hacia las baterías (para los vehículos híbridos y eléctricos), velocidad del vehículo, distancia recorrida, tiempo transcurrido y variables meteorológicas, mediante un sistema de monitoreo implementado siguiendo las normas internacionales para la evaluación de vehículos de servicio de transporte urbano.

Los factores de emisión se calculan teniendo como insumos las emisiones reportadas por el analizador de gases, el flujo volumétrico reportado por el flujómetro y la distancia recorrida reportada por el GPS. Se deben definir las emisiones globales de la prueba o del ciclo y posteriormente se deben reportar las emisiones específicas, es decir, por unidad de distancia

recorrida. Para el caso del material particulado se puede emplear, además de la concentración reportada por el medidor de MP, la información del dilutor, para poder considerar los efectos de la dilución de la muestra y la tasa a la cual esta se lleva a cabo para cada segundo. El consumo de combustible se mide directamente, mediante la instalación de tanques de combustible externos que pueden ser fácilmente pesados antes y después de cada prueba. El consumo también se calcula indirectamente mediante un balance de carbono, es decir, a partir de las emisiones medidas y la composición del combustible.

Conociendo el consumo específico de combustible, es posible calcular la eficiencia energética en kilómetros por litro de combustible, al ser esta la inversa del consumo específico.

Este protocolo aplica para cualquier vehículo que opere o se desee ingrese al SITP de Bogotá, y debe ser entendido como un lineamiento técnico que deben seguir los fabricantes de vehículos para determinar el desempeño ambiental y energético de sus modelos.



## 1. Protocolo para la medición de factores de emisión y eficiencia energética

Los factores de emisiones y de eficiencia energética deben ser calculados a través de la medición de consumo y factores de emisión en ruta y dinamómetro, utilizando un analizador de gases y un medidor de material másico de particulado. Esta alternativa permite obtener resultados en ruta que son los más confiables en unidades de gramos por kilómetro y si se desean comparar estos resultados con las normas internacionales cuyas unidades son gramos por kilovatio-hora permite aproximar bastante bien la información obtenida en dinamómetro con la información obtenida en ruta. Además permite retroalimentar el ciclo de manejo que se tenga propio para las condiciones que se desean estudiar, permitiendo además extrapolar los resultados obtenidos por los vehículos siguiendo ciclos estandarizados a las condiciones de ruta.

Para que esta alternativa de medición sea lo más confiable posible es necesario seguir rigurosamente algunos protocolos de medición tanto para las pruebas de ruta como para las pruebas en dinamómetro.

### 1.1 Consideraciones para mediciones en ruta

Para realizar las mediciones en ruta es necesario seguir el siguiente protocolo:

- Debe ejecutarse la ruta definida por la autoridad ambiental. Esta ruta considera las condiciones de tráfico típicas de la ciudad, así como incluye distintas facetas de su geografía que permiten realizar posteriormente un análisis por zonas. Al identificar distintas zonas dentro de la ruta que tengan características particulares es posible realizar análisis exclusivos para estas condiciones, lo cual resulta beneficioso porque es posible estudiar de forma más completa el desempeño de los vehículos sin necesidad de realizar distintas rutas, de esta forma se obtienen factores zonales y factores globales de emisión y consumo.
- La selección de la ruta consideró el volumen de tráfico, las pendientes máxima, mínima y promedio, el impacto social de la ruta, es decir se incluyó la matriz origen-destino, se consideró además la velocidad promedio de la ruta, el número de paradas obligadas que deben realizar los vehículos por esta trayectoria y por último una ruta lo más larga posible mientras se pueda garantizar la repetibilidad de los resultados así como las limitantes técnicas de los equipos utilizados para realizar las mediciones.
- Deben seleccionarse equipos de medición como GPS, analizador de gases, flujómetro y medidor másico de material particulado que cumplan con los requerimientos de la ruta y del estudio, además que garanticen fiabilidad en los resultados y en su funcionamiento.
- Para las pruebas de consumo se hace necesario instalar un tanque externo de combustible, de forma que este se pueda pesar fácilmente antes y después de cada prueba para conocer el consumo específico de cada vehículo durante el recorrido. El tanque externo permite además que los responsables de la medición puedan garantizar la calidad del combustible y la igualdad del mismo para todos los vehículos participantes.
- Los vehículos deben ser cargados con el 70% de su peso bruto. El peso promedio por pasajero considerable es de 68,1 kilogramos, repartidos un 60% en canecas de agua y el 40% restante en bultos de arena, lo cual permite simular el efecto de los pasajeros sentados y parados en la dinámica del vehículo.

- Los equipos de medición, analizador de gases, medidor material particulado, flujómetro y dilutor deben ser instalados lo más cercanamente posible al tubo de escape, para evitar caídas de presión excesivas en la muestra y garantizar además que la composición medida por el analizador de gases se corresponda lo mejor posible con la composición a la salida del tubo de escape, reduciendo por lo tanto los efectos de las reacciones secundarias. Para garantizar también lo anterior debe considerarse una manta térmica que mantenga constante la temperatura de los gases de escape en la línea de muestreo del analizador de gases.
- Se debe anotar el kilometraje del bus antes y después de cada prueba, para compararlo y usarlo como medición alternativa en caso que los GPS pierdan señal, lo cual es frecuente.
- El tanque de combustible externo debe pesarse antes y después de la prueba, así como medir la temperatura del combustible para efectos de corrección por densidad.
- Se debe extraer una muestra de combustible para cada vehículo, en caso que no se haya establecido una estación de servicio particular para rellenar los tanques, en este caso basta con tomar una muestra de combustible para todos los vehículos por día.
- Para las pruebas en ruta, se hace necesario incluir una planta eléctrica, puesto que los equipos de medición funcionan con energía eléctrica y no se debe cargar al vehículo con este consumo adicional.
- Equipos como el analizador de gases requiere ser calibrado antes de cada prueba, se le debe realizar un SPAN, un ZERO y un AUDIT antes de la prueba y únicamente un AUDIT al final de la prueba. Para estas calibraciones se hace necesario tener disponibilidad de gases patrones, se requiere un gas neutro (nitrógeno), un gas de baja concentración y un gas de alta concentración.
- Para la medición de los hidrocarburos totales se hace necesario tener disponibilidad de gas FID (60% H<sub>2</sub> y 40% He), el cual antes de cada prueba es rellenado en una pipeta desde una pipeta más grande y conectado al sistema de válvulas y manómetro una bomba de vacío la cual garantice el vacío en la línea de llenado antes de desconectar las pipetas puesto que se manejan presiones del orden de los 1500 psi. Finalmente la pipeta pequeña se introduce y conecta al analizador de gases. Se debe poner especial cuidado a las fugas de este gas por ser inflamable.
- Las pruebas se inician una vez todos los equipos hayan sido calibrados y se confirme su correcto funcionamiento. Cuando la prueba se haya iniciado se debe monitorear el correcto funcionamiento de los equipos durante la prueba, así como las lecturas de composición, flujo y temperatura para poder advertir inconvenientes y solucionarlos a tiempo sin necesidad de repetir la prueba.
- Una vez finalizada la prueba se procede a descargar los archivos desde los equipos y sistemas de adquisición de datos a un computador para ser posteriormente procesados.

## 1.2 Consideraciones para mediciones en banco dinamométrico

Para las mediciones en el banco dinamométrico se contemplan las mismas consideraciones que para las mediciones en ruta, sin embargo se enunciarán completamente a continuación.

- Para el caso de las pruebas en dinamómetro se requiere seleccionar equipos como el analizador de gases y medidor másico de material particulado; el GPS para esta tipo de prueba se hace innecesario puesto que la posición geográfica del vehículo va a permanecer constante.

- Para las pruebas de consumo se hace necesario instalar un tanque externo de combustible, de forma que este se pueda pesar fácilmente antes y después de cada prueba para conocer el consumo específico de cada vehículo durante el recorrido. El tanque externo permite además que los responsables de las mediciones puedan garantizar la calidad del combustible y la igualdad del mismo para todos los vehículos participantes.
- Los vehículos deben ser cargados con el 70% de su peso bruto. El peso promedio por pasajero considerable es de 68,1 kilogramos, repartidos un 60% en canecas de agua y el 40% restante en bultos de arena, lo cual permite simular el efecto de los pasajeros sentados y parados en la dinámica del vehículo. Si bien la carga que pueda añadirse al vehículo no afecta la dinámica del vehículo por estar montado en un dinamómetro si permite mejorar considerablemente el peso sobre los rodillos ayudando a disminuir el patinamiento y deslizamiento de los neumáticos, lo cual puede ser más frecuente de lo que parece por tratarse de vehículos de alto torque.
- Los equipos de medición, analizador de gases, medidor másico de material particulado, flujómetro y dilutor deben ser instalados lo más cercanamente posible a tubo de escape, para evitar caídas de presión excesivas en la muestra y garantizar además que la composición medida por el analizador de gases se corresponda lo mejor posible con la composición a la salida del tubo de escape, reduciendo por lo tanto los efectos de las reacciones secundarias. Para garantizar también lo anterior debe considerarse una manta térmica que mantenga constante la temperatura de los gases de escape en la línea de muestreo del analizador de gases.
- Se debe anotar el kilometraje del bus antes y después de cada prueba, para compararlo y usarlo como medición alternativa al kilometraje aportado por el software del dinamómetro.
- El tanque de combustible externo debe pesarse antes y después de la prueba, así como medir la temperatura del combustible para efectos de corrección por densidad.
- Es importante extraer una muestra de combustible para cada vehículo.
- Para las pruebas en dinamómetro, no se hace necesario incluir una planta eléctrica, puesto que los equipos de medición pueden enchufarse a una toma.
- Equipos como el analizador de gases requiere ser calibrado antes de cada prueba, se le debe realizar un SPAN, un ZERO y un AUDIT antes de la prueba y únicamente un AUDIT al final de la prueba. Para estas calibraciones se hace necesario tener disponibilidad de gases patrones, se requiere un gas neutro (nitrógeno), un gas de baja concentración y un gas de alta concentración.
- Para la medición de los hidrocarburos totales se hace necesario tener disponibilidad de gas FID (60% H<sub>2</sub> y 40% He), el cual antes de cada prueba es rellenado en una pipeta desde una pipeta más grande poniendo especial cuidado a las fugas de este gas por ser inflamable y conectado al sistema de válvulas y manómetro una bomba de vacío la cual garantice el vacío en la línea de llenado antes de desconectar las pipetas puesto que se manejan presiones del orden de los 1500 psi. Finalmente la pipeta pequeña se introduce y conecta al analizador de gases.
- Las pruebas se inician una vez todos los equipos hayan sido calibrados y se confirme su correcto funcionamiento. Cuando la prueba se haya iniciado se debe monitorear el correcto funcionamiento de los equipos durante la prueba, así como las lecturas de composición, flujo y temperatura para poder advertir inconvenientes y solucionarlos a tiempo sin necesidad de repetir la prueba.
- Una vez finalizada la prueba se procede a descargar los archivos desde los equipos y sistemas de adquisición de datos a un computador para ser posteriormente procesados.

A continuación se detallan algunos procedimientos generales que se deben tener en cuenta para una prueba en dinamómetro, dichos procedimientos fueron extraídos de la Norma SAE J1711 v002. El procedimiento que se muestra a continuación es exclusivo para vehículos híbridos, pero para vehículos convencionales únicamente debe hacerse caso omiso a los numerales donde se haga referencia al sistema híbrido o al sistema de almacenamiento de energía RESS.

### 1.3 Procedimientos para la ejecución de las pruebas

#### 1.3.1 Condiciones de prueba

Se debe tener un lugar adecuado para llevar a cabo las pruebas en el dinamómetro, el lugar debe garantizar una ventilación para la refrigeración del motor de combustión interna así como de las baterías o cualquier otro sistema de RESS, además de proveer protección contra altos voltajes y otros tipos de precauciones propios al momento de realizar este tipo de pruebas.

#### 1.3.2 Condiciones del vehículo

- Estabilización

Antes de la prueba el vehículo a probar deberá ser estabilizado, es decir que debe tener un kilometraje acumulado de al menos 3200 kilómetros o según las recomendaciones del fabricante, el objetivo es garantizar que tanto el vehículo como las baterías, en el caso de los vehículos híbridos, se encuentren en un estado óptimo para que los resultados de las pruebas tengan más validez.

Para los vehículos híbridos con posibilidad de carga externa, se recomienda recargar el RESS hasta el estado de máxima carga al menos una vez entre cada recarga de combustible, pero también se debe tener en cuenta que la frecuencia de carga del RESS no deberá ser superior a lo anticipado para un uso normal del vehículo.

- Accesorios

Los vehículos deberán ser probados con los accesorios de serie, como por ejemplo los espejos, guarda choques entre otros. Algunos accesorios que puedan representar una amenaza para las condiciones de seguridad de la prueba deberán ser retirados como por ejemplo las tapas de los rines que pueden desprenderse a altas velocidades.

- Peso

El vehículo deberá ser probado con el peso especificado en la norma bajo la cual se desee ensayar el vehículo. La recomendación dada por la Norma SAE J1711 v002 y SAE J2711 es que se debe cargar el vehículo hasta el 70% de su peso bruto.

- Llantas

El fabricante deberá recomendar las llantas que se usarán en la prueba.

- Presión de las llantas

Para prueba en dinamómetro la presión de las llantas deberá ser chequeada al inicio de la prueba por el fabricante y ajustada al valor recomendado. Ese valor de presión recomendado establecerá los coeficientes de pérdida por rodadura en el dinamómetro, pero en ningún momento las presiones podrán exceder los niveles necesarios para una operación segura.

- Condiciones de las llantas

La condición de las llantas deberá estar de acuerdo a las recomendaciones del fabricante. Las llantas deberán acumular un mínimo de 100 Km y tener al menos un 50% de la profundidad de la huella original.

- Lubricantes

Los lubricantes normalmente recomendados por el fabricante deberán ser utilizados.

- Cambio de marchas

Durante la prueba, la transmisión del vehículo deberá ser operada como lo especifica el ciclo que se desee seguir en el dinamómetro, si la información de los cambios de marcha no se tiene disponibles o si el vehículo es de transmisión semi-automática o automática los cambios de marcha se deben realizar de forma que el vehículo pueda seguirlo cumpliendo con las tolerancias del ciclo.

- Frenado regenerativo

Si el vehículo posee un sistema de frenado regenerativo, este sistema deberá ser habilitado para todas las pruebas en el dinamómetro, con excepción de las pruebas preparatorias como la determinación del coeficiente de carga por rodadura.

Dependiendo de cómo el vehículo se acople al sistema de frenado de los rodillos del dinamómetro, la forma más precisa de contabilizar el efecto del frenado regenerativo es probar el vehículo en un dinamómetro eléctrico para vehículos con tracción en las cuatro ruedas. Sin embargo algunos estudios (Duoba 2005) han demostrado que la contribución del frenado regenerativo en muchos vehículos híbridos modernos es casi idéntica cuando se realizan las pruebas en un dinamómetro para dos ruedas motrices o para cuatro ruedas motrices. Deberá tenerse también en cuenta las recomendaciones de los fabricantes sobre el tipo de dinamómetro que se deberá usar para probar los vehículos.

- Control de tracción

Si el vehículo es equipado con un sistema de frenado con antibloqueo (ABS) o un sistema de control de tracción (TCS) y es probado en un dinamómetro para dos ruedas motrices el ABS o TCS pueden interpretar la inactividad de las ruedas, en este caso es mejor deshabilitar estos sistemas para conservar los demás sistemas del vehículo operando perfectamente.

### 1.3.3 Condiciones del RESS (Sólo para vehículos híbridos)

- Estabilización del RESS

El RESS deberá haber sido estabilizado con el vehículo o por condiciones equivalentes o según lo sugiera el fabricante.

- Carga externa

Si el vehículo es equipado con un cargador, el cargador deberá ser usado para todas las cargas externas del RESS. De otra manera el RESS deberá ser cargado con un cargador externo recomendado por el fabricante del vehículo. Si múltiples niveles de potencia de carga son aceptables, entonces el RESS deberá ser recargado el nivel más alto de potencia que el sistema pueda aceptar. El periodo de carga incluye el tiempo desde que el vehículo es conectado hasta que es finalmente desconectado de la fuente de carga externa.

- Falla del RESS

En el evento en que el RESS se dañe o tenga una capacidad de almacenar energía por debajo del rango establecido por el fabricante, el RESS deberá ser remplazado y la prueba repetida. Pruebas con fallas en el RESS deberán considerarse inválidas.

#### 1.3.4 Condiciones de operación del dinamómetro

- Capacidades

Dinamómetros utilizados para probar vehículos HEV, deberán cumplir con las capacidades especificadas en la norma 40 CFR Part 86.108-00, entre las que se incluye la capacidad de controlar la carga de inercia durante el ciclo de manejo, poder manejar el peso del vehículos sobre los rodillos y tener la capacidad de manejar los valores de torque y potencia esperados para el vehículo según las especificaciones dadas por el fabricante.

- Configuración

Los dinamómetros usados en pruebas de vehículos HEV deberán ser configurados como lo especifica la norma 40 CFR Part 86-108-00 (b) (2), en la cual se establece el uso de un rodillo sencillo de 48 pulgadas, y un dinamómetro de chasis eléctrico. Si el HEV es de tracción en las cuatro ruedas, entonces el dinamómetro deberá ser para cuatro ruedas motrices. De otra forma los vehículos de tracción integral (desconectables) pueden ser probados en modo 2WD para las condiciones especificadas en la norma 40 CFR Part 86.135-90(i). También de ser posible el dinamómetro deberá ser programable tanto para que pueda seguir un ciclo cualquiera, por ejemplo el ciclo específico para la ciudad de Bogotá, como también deberá ser programable para poder variar la carga durante el ciclo según las pendientes y efectos que se deseen simular.

- Calibración

El dinamómetro deberá ser calibrado según lo especificado en la norma 40 CFR Part 86-118-00, o en su defecto tener un certificado de calibración vigente del fabricante o representante del mismo.

- Frenado aumentado

La característica de frenado aumentado en el dinamómetro deberá ser deshabilitada mientras se

prueben vehículos HEV y PHEV, porque este interfiere con el adecuado funcionamiento del sistema de frenado regenerativo.

- Calentamiento

Si el dinamómetro no ha estado siendo operado durante 2 horas antes de llevarse a cabo las pruebas, entonces deberá ser calentado utilizando un vehículo distinto a los de pruebas, según lo recomiende el fabricante del dinamómetro.

- Coeficiente de carga

Los coeficientes del dinamómetro que simulan las cargas por rodadura deberán ser determinadas según lo especifica la norma SAE J2263 y J2264, con las siguientes estipulaciones:

- ✓ Los vehículos equipados con sistemas de frenado regenerativo que actúan únicamente por acción del pedal del freno no requerirán acciones especiales para probarlos tanto en la ruta como en el dinamómetro.
- ✓ Los vehículos equipados con sistemas de frenado regenerativo que son activados al menos parcialmente cuando el pedal del freno no está siendo presionado deberán tener el sistema de frenado regenerativo deshabilitado durante los periodos de desaceleración “libre” tanto para la prueba de ruta como para la dinamométrica. Preferiblemente usando el cambio neutral sin sistema de regeneración.
- ✓ Si el vehículo no es manual, por lo tanto resulta imposible ponerlo en el estado “neutro”, entonces el fabricante deberá prescribir el procedimiento y métodos de cálculo.
- Potencia de absorción e inercia

La potencia de absorción del dinamómetro y la simulación de la inercia deberán ajustarse según lo especificado en el manual del dinamómetro de acuerdo al peso del vehículo que se va a probar.

### 1.3.5 Corridas de práctica

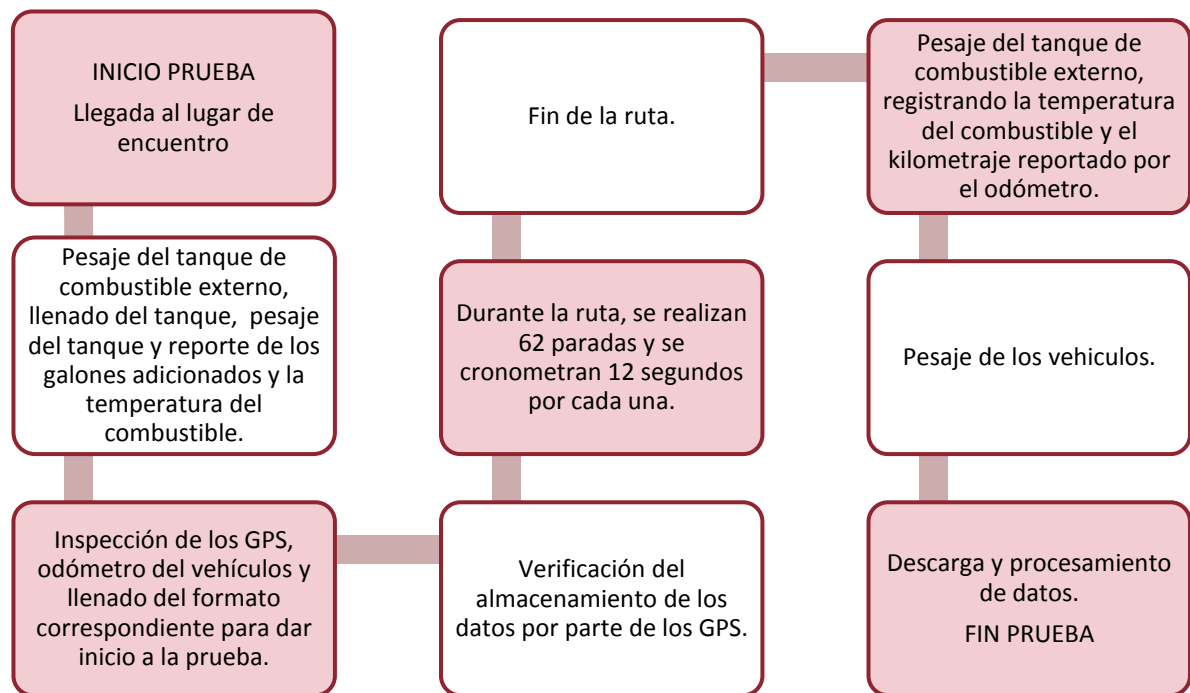
Las prácticas sobre el ciclo de manejo a seguir durante la prueba son deseables, puesto que harán sentir al piloto de pruebas más comfortable con la operación del vehículo y con el ciclo que se pretende seguir, haciendo posible reducir al máximo los rangos de tolerancia de forma que la prueba se asemeje lo más posible al ciclo ideal.

## 2. Metodología

El presente capítulo describe cada uno de los componentes considerados para determinar la eficiencia energética, el consumo de combustible y las emisiones de contaminantes atmosféricos. En el caso de las pruebas en ruta, cada vehículo es instrumentado con unidades para determinar su recorrido, sus condiciones de operación, su consumo de combustible y sus emisiones de contaminantes atmosféricos. La Figura 1 y la Figura 2 muestran los procedimientos generales que se llevan a cabo durante las pruebas en ruta. Se aclara que la ruta seleccionada es recortada en la estimación de las emisiones con el propósito de garantizar repetibilidad sin prescindir de las características propias de la ruta original

Por su parte, la ejecución de pruebas en el dinamómetro ofrecen factores de emisión en gramos por kilovatio hora tal y como se describe en la Figura 3.

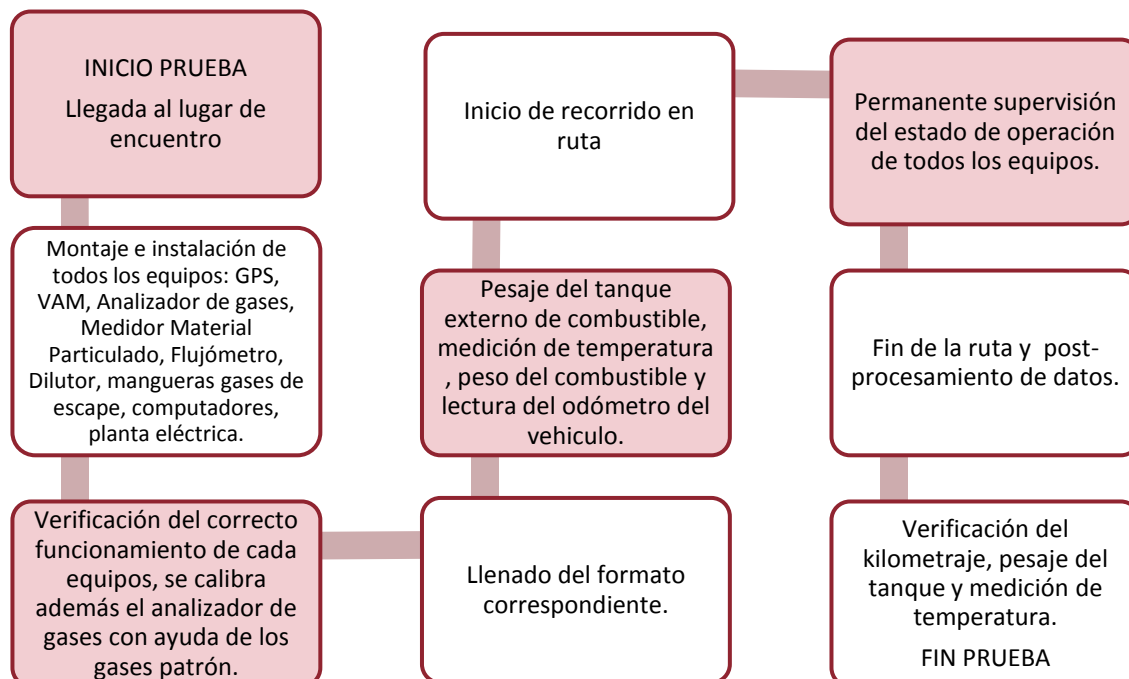
Figura 1. Esquema de actividades durante la medición de consumo de combustible durante la ruta completa



Fuente: Elaboración propia

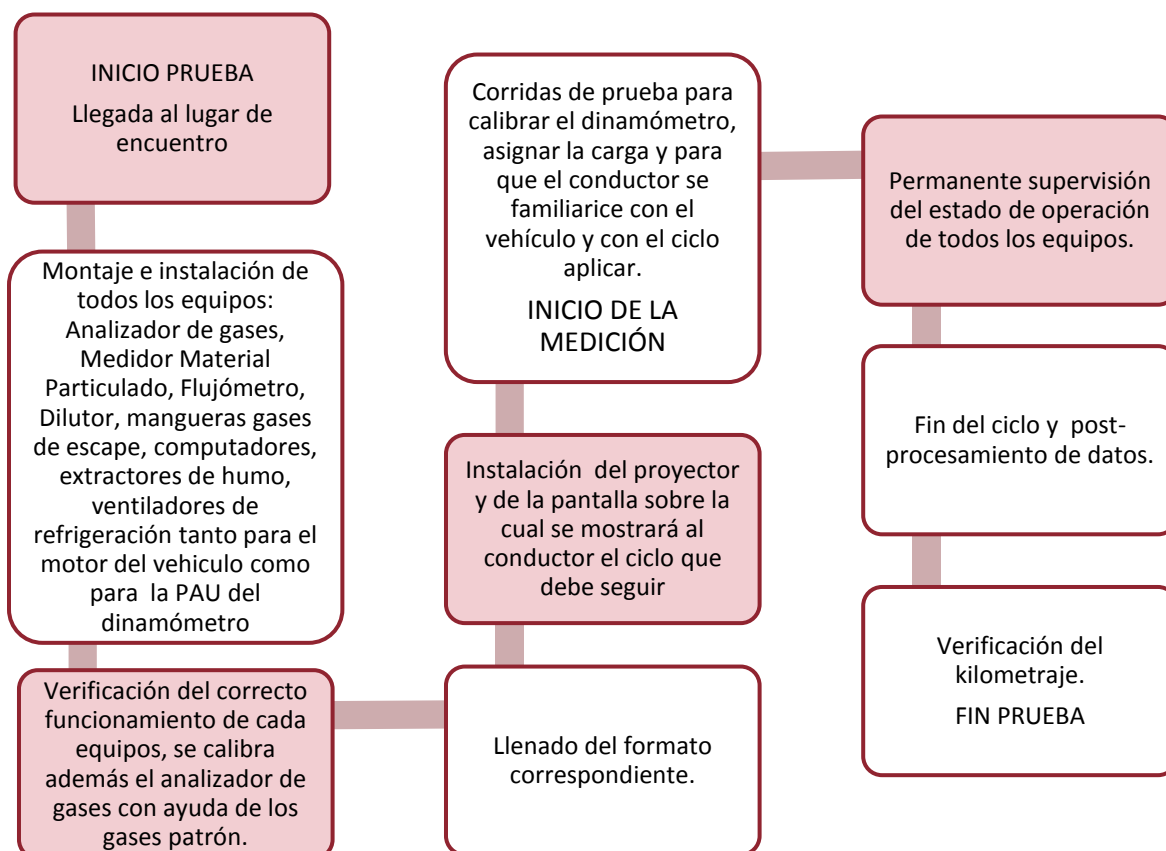


Figura 2. Esquema actividades durante la medición de emisiones en ruta recortada



Fuente: Elaboración propia

Figura 3. Esquema actividades durante la medición de consumo de combustible y emisiones en el dinamómetro



Fuente: Elaboración propia

## 2.1 Descripción de los equipos de medición y sistemas de muestreo

El sistema para medición de material particulado consta de un medidor de material particulado, sistema de dilución de gases, computador, flujómetro, bomba de vacío y conectores. El sistema de medición de gases consta de un analizador de gases, flujómetro, GPS, medidor de temperatura ambiente y humedad relativa, fuente de poder, batería de 12V, computador, compresor de nueve (9) CFM, sistemas de conexión y manta térmica. El sistema de suministro eléctrico consta de la unidad electrógena (5 KW) y cableado.

Los equipos mínimos a ser empleados para la medición de las emisiones se describen en la Tabla 1.

**Tabla 1. Equipos de análisis de gases de escape, de medición de material particulado y de flujo de gases de escape**

Nombre	Descripción
Medidor másico de material particulado	Instrumento para mediciones en tiempo real de emisiones vehiculares de material particulado, en el rango 0.03-10µm. Resolución de muestreo de hasta 10 hz. Y/O Instrumento para mediciones en tiempo real de emisiones vehiculares de material particulado, en el rango 0.03-1.5 µm.
Muestreador de partículas	Muestreador de partículas finas. Relación de dilución ajustable en tiempo real, con software propio para la gestión de todos los sistemas. Dilutor y múltiples sensores que garantizan la correcta operación del equipo y la definición de las mismas en función de múltiples parámetros.
Analizador de gases para diesel	Permite el análisis de flujo de gases de escape en ruta y en tiempo real. Dispositivo que mide directamente flujo total en el escape de un vehículo en forma continua mientras este se encuentra en operación. Preferiblemente que use método (FID) con analizadores infrarrojo y ultravioleta no dispersivo (NDIR y NDUV). Estos métodos permiten medición simultánea para THC, CO, CO <sub>2</sub> , NO y NO <sub>2</sub> , en tiempo real con línea de muestreo a 190°C. Aprobados por EPA para su utilización en medición a bordo de emisiones vehiculares. Que incluya software especializado, así como sensores de temperatura y humedad relativa ambiente
Monitor de Actividad de Vehículo	(Vehicle Activity Monitor) GPS de alta sensibilidad que permite el monitoreo de vehículos mediante seguimiento satelital con alta precisión. 1hz de muestreo. Capacidad de almacenamiento de datos de sensores externos.
Módulo de adquisición de datos (DAQ) multifunción.	Que ofrezca suficientes entradas analógicas BNC diferenciales; velocidad de muestreo de 400 kS/s; salidas BNC analógicas; líneas de E/S digital (ocho BNC); diversos rangos de entrada programables (±0.2 V a ±10 V) por canal; disparo digital; contadores/temporizadores y una terminal BNC definida por el usuario.
Sonda	Sonda para medición de voltaje DC, muestreo hasta 200 MHz.
Medidor de flujo	Módulo de medición de flujo de combustible diferencial con sistema de adquisición de datos en tiempo real. Muestreo desde 0 a 250 lats por hora.
Inclinómetro	Inclinómetro de dos ejes con comunicación USB.

Fuente: Sensors, Inc; National Instruments, Sistemas Sustentables, ptilmahse, Tektronix.

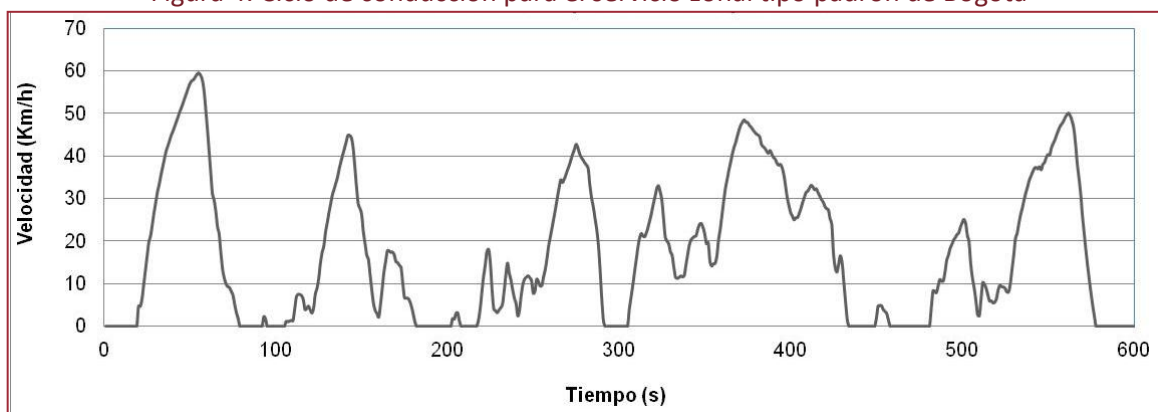
Debe presentarse certificados de calibración expedidos por laboratorios externos. Las fichas técnicas de los equipos y el certificado de calibración de los gases empleados.

Un dispositivo de apoyo para monitorear la dinámica vehicular es la unidad de registro de actividad vehicular (VAM), la cual se encarga de monitorear la velocidad, aceleración, posición y elevación de los vehículos durante pruebas en ruta y dinámicas.

### 2.1.1 Vehículos tipo padrón de servicio zonal

La Figura 4 presenta el ciclo de conducción para los vehículos tipo padrón del servicio zonal.

Figura 4. Ciclo de conducción para el servicio zonal tipo padrón de Bogotá

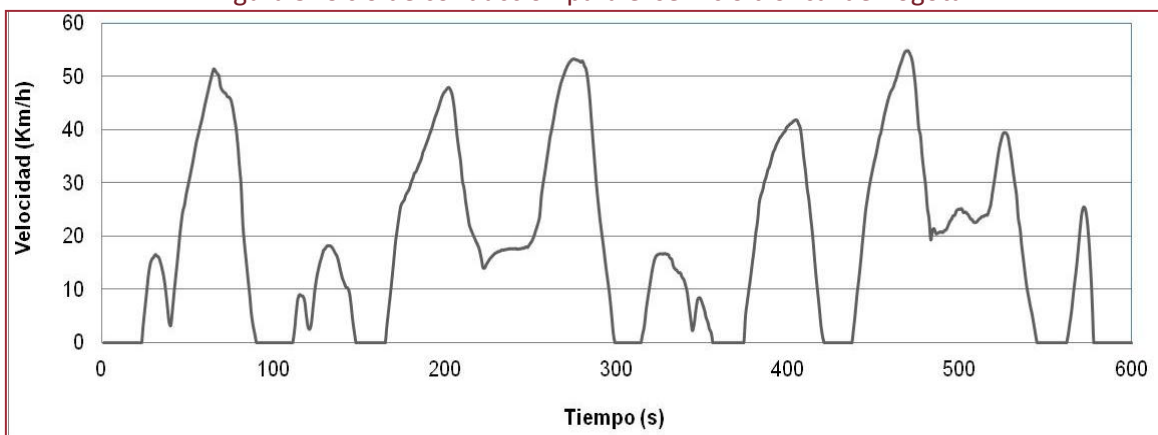


Fuente: Elaboración propia

### 2.1.2 Vehículos articulados y biarticulados de servicio troncal

La Figura 5 presenta el ciclo de conducción obtenido para los vehículos articulados y biarticulados del servicio troncal.

Figura 5. Ciclo de conducción para el servicio troncal de Bogotá

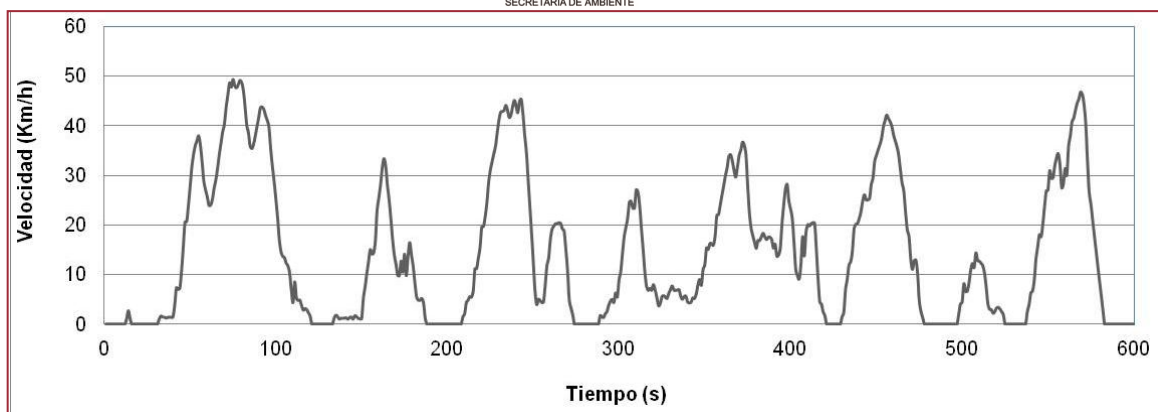


Fuente: Elaboración propia

### 2.1.3 Vehículo de menor tipología perteneciente al servicio zonal

La Figura 6 presenta el ciclo de conducción obtenido para los vehículos de tipologías menores pertenecientes al servicio zonal.

Figura 6. Ciclo de conducción para el servicio SITP zonal de Bogotá



Fuente: Elaboración propia

## 2.2 Descripción de rutas para pruebas de consumo de combustible y emisiones

### 2.2.1 Vehículos tipo padrón de servicio zonal

La ruta descrita en el presente documento es representativa para los recorridos realizados por los buses tipo padrón del SITP.

Para la prueba de emisiones, la ruta definida es recortada debido a la necesidad de contar con mediciones repetibles, es decir, que estén influenciadas en la menor medida posible por factores externos puntuales, tales como accidentes de tránsito, trancones poco usuales, entre otros. Se garantiza que las pruebas son repetibles sin prescindir de las características principales de la ruta original, las cuales son: poseer una pendiente significativa, conservar la pendiente promedio, poseer un tramo llano considerable el cual garantice conocer el comportamiento de los vehículos en estas condiciones y por último, conservar la velocidad promedio y mantener la intensidad del número de paradas.

- Ruta definida para determinar el consumo de combustible

La ruta seleccionada, de forma general, consiste en un recorrido en sentido oriente – occidente en la primera etapa, sur – norte en la segunda etapa y norte – sur en la etapa final donde se regresa al punto de inicio. Esta ruta recorre puntos claves de la ciudad, como el centro histórico, la Avenida Circunvalar, la zona de las universidades sobre la Calle 19 con Carrera 3ra, el sector sur de la Avenida Primero de Mayo y la entrada hacia Bosa, cruzando por Patio Bonito, el sector del Parque Metropolitano Simón Bolívar, el Campus de la Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá, el sector Norte de la Avenida Ciudad de Quito (Carrera 30) y la Avenida 19.

El recorrido es circular, tiene una extensión de 73,9 km y la pendiente máxima que se enfrenta es de 12,3 %. El perfil de elevación de la ruta se muestra en la Figura 7.

La ruta inicia en la Calle 6ta con Carrera 24, donde está ubicada una estación de servicio y es el lugar de encuentro. En esta estación de servicio se realiza el repostaje de combustible, además de un chequeo general de los vehículos y de los equipos de medición. Por último se diligencian los

formatos correspondientes a las pruebas de consumo de combustible.

Para iniciar la prueba se toma la carrera 24 hacia el norte, posteriormente la ruta se dirige al oriente por la Calle 19, donde se inicia un ascenso hacia la avenida circunvalar desde la Universidad de los Andes. En esta etapa es donde se evalúan los vehículos en ascenso. El recorrido continúa por la Avenida Circunvalar hacia la iglesia del barrio Egipto hasta llegar a la Calle 6ta. Se toma la Calle 6ta hacia el occidente. Este tramo de la ruta es claramente en descenso hasta llegar a la carrera 30, a partir de ahí la ruta se puede considerar de nuevo como llana puesto que tiene una pendiente muy baja, inferior al 3 %.

El recorrido se extiende hacia el occidente desde la Calle 6 hasta la Carrera 42. Al llegar a la Carrera 42 la ruta cambia su sentido hacia el sur hasta la Calle 3. Posteriormente se transita por la Calle 3 hasta llegar a la Carrera 68. Se avanza hacia el sur nuevamente por la Carrera 68 hasta la Avenida Primero de Mayo, por esta vía la ruta se dirige hacia el suroccidente, llegando hasta Bosa, en donde se hace el retorno para regresar por la misma ruta, es decir, por la Avenida Primero de Mayo hasta la Carrera 68. Después se toma la Carrera 68 en dirección norte hasta la Calle 53, donde se gira hacia el oriente pasando por la Universidad Nacional de Colombia. Luego se continúa por la Carrera 30 (NQS) hasta la Calle 127 para retornar finalmente por la Carrera 19 y regresar por la Carrera 30 hasta la Calle 19. El tráfico en la ruta es elevado, sin llegar a presentar trancones que superen los 20 minutos en los días de pruebas y de reconocimiento de la ruta.

El estado de la vía y de las calles es aceptable para la circulación de vehículos de las dimensiones y el peso de un bus tipo padrón. Sin embargo, en la zona del centro aledaña a la Universidad de los Andes las vías son muy estrechas y no están preparadas para la circulación y el peso de este tipo de vehículo, estando las calles cubiertas con adoquines que presentan un deterioro considerable.



Figura 7: Recorrido de la ruta para evaluación de consumo de combustible de buses padrón.



Fuente: Elaboración propia utilizando la aplicación Google Earth®

Figura 8. Perfil de elevación de la ruta para las pruebas de consumo de combustible.



Fuente: Elaboración propia utilizando la aplicación Google Earth®

- Ruta definida para medir emisiones

La ruta para medición de emisiones parte de la Universidad Nacional de Colombia – Sede Bogotá, en la entrada de la calle 53 tomando la Carrera 30 (o NQS) hacia el sur. Llega hasta la Calle 19 donde cambia su sentido hacia el oriente (vía los cerros orientales bogotanos). Ascende hasta el barrio Egipto (circulando por zona de ascenso prologando), y desciende hacia el occidente por la Calle 6 pasando cerca a la Plaza de Bolívar. Por la Avenida de los Comuneros, se desplaza hacia el occidente, llegando a la Avenida 68. Una vez en la Avenida 68, toma hacia el norte hasta alcanzar la Calle 53 girando en sentido oriente. Por la Calle 53 en sentido occidente-oriente, llega hasta el centro de operaciones ubicado en el campus de la Universidad Nacional de Colombia (Véase Figura 9).

- La ruta parte de la Universidad nacional Sede Bogotá, Calle 53 con Carrera 30, hacia el sur con una pendiente muy reducida que podría clasificarse como llana. Posteriormente, se dirige al oriente por la Calle 19, donde se inicia un ascenso hacia la avenida circunvalar desde la Universidad de los Andes. En esta etapa es donde se evalúan los vehículos en ascenso, posteriormente se inicia el descenso desde la sede la Macarena de la Universidad Distrital.
- El descenso continúa por la iglesia de Egipto y por la Calle 6. Desde la Calle 6 con Carrera 30, la ruta se puede considerar de nuevo como llana puesto que tiene una pendiente baja.
- El recorrido continúa hacia el occidente por la Calle 6 hasta la carrera 42, se toma la Carrera 42 hasta la Calle 3 y posteriormente se continua por la Calle 3 hasta la Carrera 68, donde se toma la Carrera 68 en dirección norte, hasta llegar a la Calle 53, por la cual se avanza hacia el oriente y se cierra el circuito ingresando a la Universidad Nacional de Colombia.
- La distancia total recorrida para un ciclo de medición es de 27,3 km, considerando el recorrido de salida y entrada en el campus de la Universidad. La distancia total desde que cruza la entrada de la universidad y regresa a este punto es de 25,7 km.



Figura 9.Recorrido ruta bus padrón para medición de emisiones



Fuente: Elaboración propia utilizando la aplicación GoogleEarth®

Figura 10. Perfil de elevación ruta bus padrón para medición de emisiones



Fuente: Elaboración propia utilizando la aplicación Google Earth®

Para las pruebas de emisiones, se deben repetir las paradas definidas en la ruta general. En total, se practicarán veinte (20) paradas durante el recorrido, con una duración de doce (12) segundos por parada. Estas paradas fueron definidas previamente de manera clara durante la selección de la ruta general y atienden las detenciones del sistema zonal de SITP, el flujo de pasajeros, la disponibilidad de paraderos y la conveniencia de la vía.

En la prueba de consumo se realizan sesenta y cuatro (64) paradas mientras en la prueba de emisiones se realizan veinte (20) paradas, lo cual corresponde aproximadamente a una parada por cada kilómetro recorrido lo cual es suficiente para determinar el comportamiento de cada uno de los buses durante las desaceleraciones, paradas y posterior arranque o periodo de aceleración. Las paradas corresponden a:

**Tabla 2. Descripción de las paradas durante los recorridos de la ruta completa**

Parada No.	Lugar	Parada No.	Lugar
1	Carrera 24 entre Calles 9 y 10	32	Avenida 68 Calle 26
2	Carrera 24 Calle 17	33	Calle 53 Carrera 66ª
3	Calle 19 con Carrera 22	34	Calle 53 Carrera 54
4	Calle 19 Avenida Caracas	35	Calle 53 Icontec
5	Calle 19 Carrera 7	36	Carrera 30 Estadio El Campín
6	Universidad de los Andes Edificio ML	37	Carrera 30 Calle 63F, Estación Simón Bolívar
7	Circunvalar - Instituto Roosevelt	38	Carrera 30 Calle 68, antes del puente
8	Circunvalar Barrio Egipto	39	Carrera 30 Calle 72, antes del puente
9	Calle 6 Carrera 5ta	40	Carrera 30 Calle 80
10	Calle 6 Avenida Caracas	41	Diagonal 92 Calle 93
11	Calle 6 Carrera 24	42	Carrera 19 Calle 100
12	Calle 6 Carrera 32, después semáforo	43	Carrera 19 Calle 116
13	Calle 6 Carrera 42	44	Carrera 19 Calle 125
14	Transversal 42 Calle 3	45	Carrera 19 Calle 125
15	Calle 3 Carrera 56	46	Carrera 19 Calle 116
16	Avenida Carrera 68 Calle 2	47	Carrera 19 Calle 100
17	Avenida 1º de Mayo Carrera 69A	48	Diagonal 92 Calle 93
18	Avenida 1º de Mayo Calle 35C	49	Carrera 30 Calle 80,
19	Hospital de Kennedy	50	Carrera 30 Calle 72
20	Avenida 1º de Mayo Calle 43	51	Carrera 30 Calle 68
21	Carrera 80 Calle 58	52	Carrera 30 Estadio El Campín
22	Carrera 80 Calle 58	53	Calle 53 UNAL
23	Avenida 1º de Mayo Carrera 80	54	Calle 53 Pablo VI
24	Avenida 1º de Mayo Calle 43	55	Calle 53 Carrera 66 a
25	Hospital de Kennedy	56	Avenida 68 Calle 26
26	Avenida 1º de Mayo Calle 35c	57	Avenida 68 Avenida La Esperanza
27	Avenida 1º de Mayo Carrera 69 a	58	Avenida 68 Calle 19
28	Avenida Carrera 68 Calle 2, puente peatonal	59	Calle 3 Avenida 68
29	Avenida 68 Calle 10	60	Calle 3 Carrera 54
30	Avenida 68 Calle 19	61	Calle 6 Transversal 42

31	Avenida 68, Avenida La Esperanza,	62	Calle 6 Carrera 32ª
----	-----------------------------------	----	---------------------

Fuente: Elaboración propia

Para el caso de la ruta recortada son las mismas excepto desde la parada #1 hasta la #3, la #15 hasta la #28 y desde la #35 hasta la #62.

### 2.2.2 Vehículos articulados y biarticulados de servicio troncal

- Ruta definida para determinar el consumo de combustible

El consumo de combustible a los buses articulados y biarticulados de servicio troncal se determina con la aplicación de la ruta para emisiones, pues en este caso, la aplicación de la misma ruta no expone las mediciones a variaciones considerables que limiten los resultados.

- Ruta definida para medir emisiones

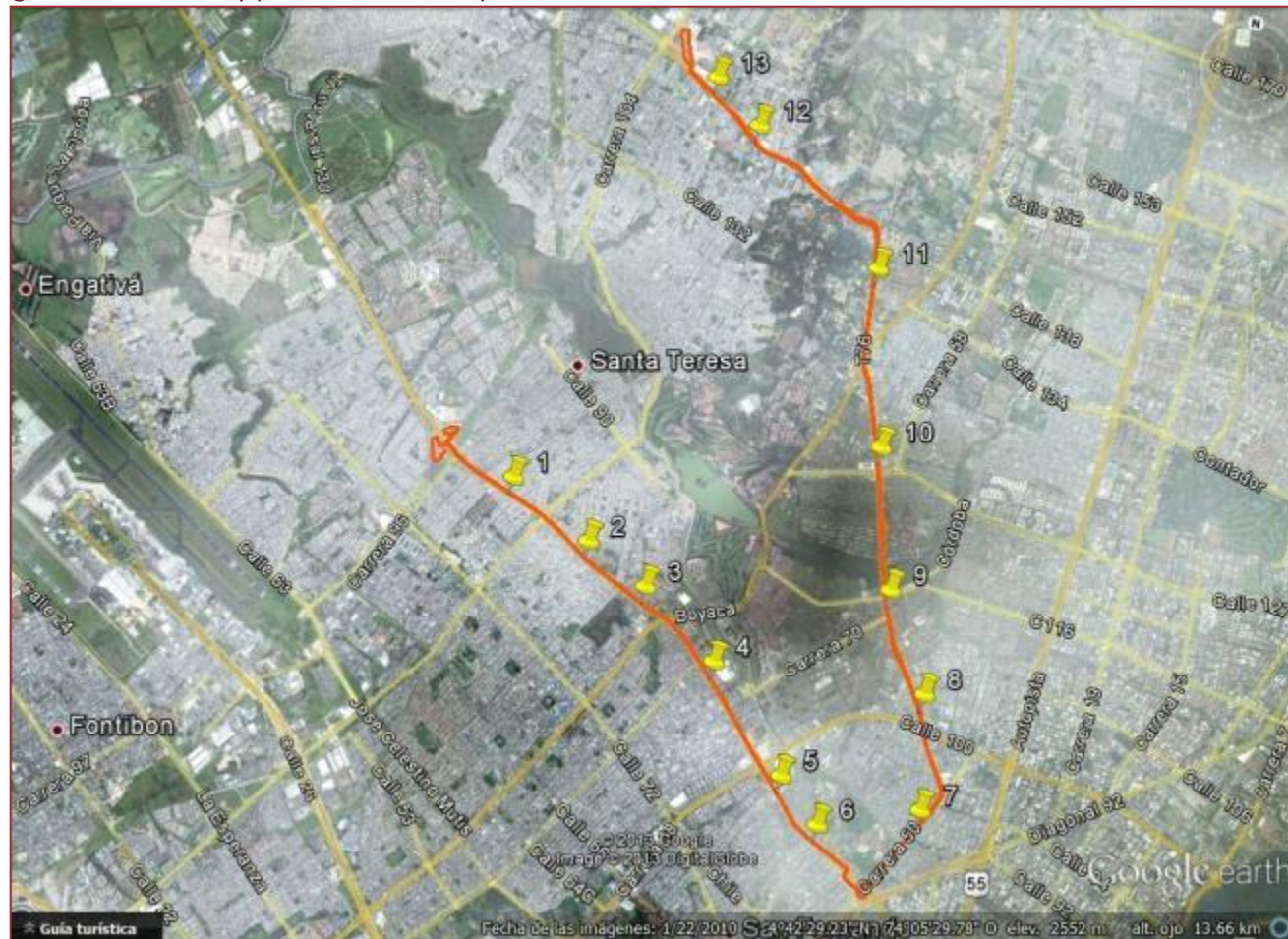
La ruta definida para la medición de emisiones inicia en los patios del Portal 80, centro de operaciones instalado para la adecuación de los vehículos sometidos a la medición. Una vez tomada la troncal, se recorrieron veinticinco (25) estaciones hasta llegar al Portal de Suba realizando trece (13) paradas como se muestra en la Figura 11. La ruta finaliza nuevamente en los patios garaje del Portal 80 donde inicia el recorrido.

La ruta parte de la Calle 80 con Carrera 96 hacia el sur oriente con una pendiente muy reducida que podría considerarse como llana hasta la Calle 80 con Carrera 47, a la altura de la estación Carrera 47. Posteriormente, se dirige al norte por la Avenida Suba, donde se inicia un ascenso prolongado hasta el Portal de Suba. En esta etapa se evalúan los vehículos en ascenso.

En la ruta se recorren 33,6 kilómetros en 1 hora 22 minutos. En trece (13) estaciones se efectúan las paradas las cuales mantienen entre sí una distancia aproximada de 450 metros, con una duración de doce (12) segundos por parada.



Figura 11. Recorrido y paradas realizadas para medición de emisiones en vehículos articulados de servicio troncal.



Fuente: Elaboración propia utilizando la aplicación Google Earth®.

Tabla3. Descripción de las paradas en los recorridos en ruta efectuados por los articulados y biarticulados objeto de estudio.

Parada No.	Estación
<b>1</b>	Carrera 90
<b>2</b>	Granja
<b>3</b>	Minuto de Dios
<b>4</b>	Ferías
<b>5</b>	Carrera 53
<b>6</b>	Carrera 47
<b>7</b>	Rionegro
<b>8</b>	Suba Calle 100
<b>9</b>	Shaio
<b>10</b>	Niza Calle 127
<b>11</b>	Gratamira
<b>12</b>	Suba Transversal 91
<b>13</b>	La Campiña

Fuente: Elaboración propia

Dadas las condiciones propias de la troncal, la ruta seleccionada mantiene condiciones constantes en cuanto a flujo de pasajeros, disponibilidad de las estaciones y condiciones de la vía se refiere.

Durante la prueba en ruta, se deben efectuar por lo menos tres (3) recorridos por vehículo. A continuación se visualiza el perfil de elevación de la ruta definida.

Figura 12. Perfil de elevación de la ruta para la evaluación de emisiones en buses del sistema Transmilenio



Fuente: Elaboración propia utilizando la aplicación Google Earth®.

### 2.2.3 Vehículo de menor tipología perteneciente al servicio zonal

- Ruta definida para determinar el consumo de combustible

El consumo de combustible a los buses articulados y biarticulados de servicio troncal se determina con la aplicación de la ruta para emisiones, pues en este caso, la aplicación de la misma ruta no expone las mediciones a variaciones considerables que limiten los resultados.

- Ruta definida para medir emisiones

La ruta definida para el tránsito de esta tipología durante las pruebas:

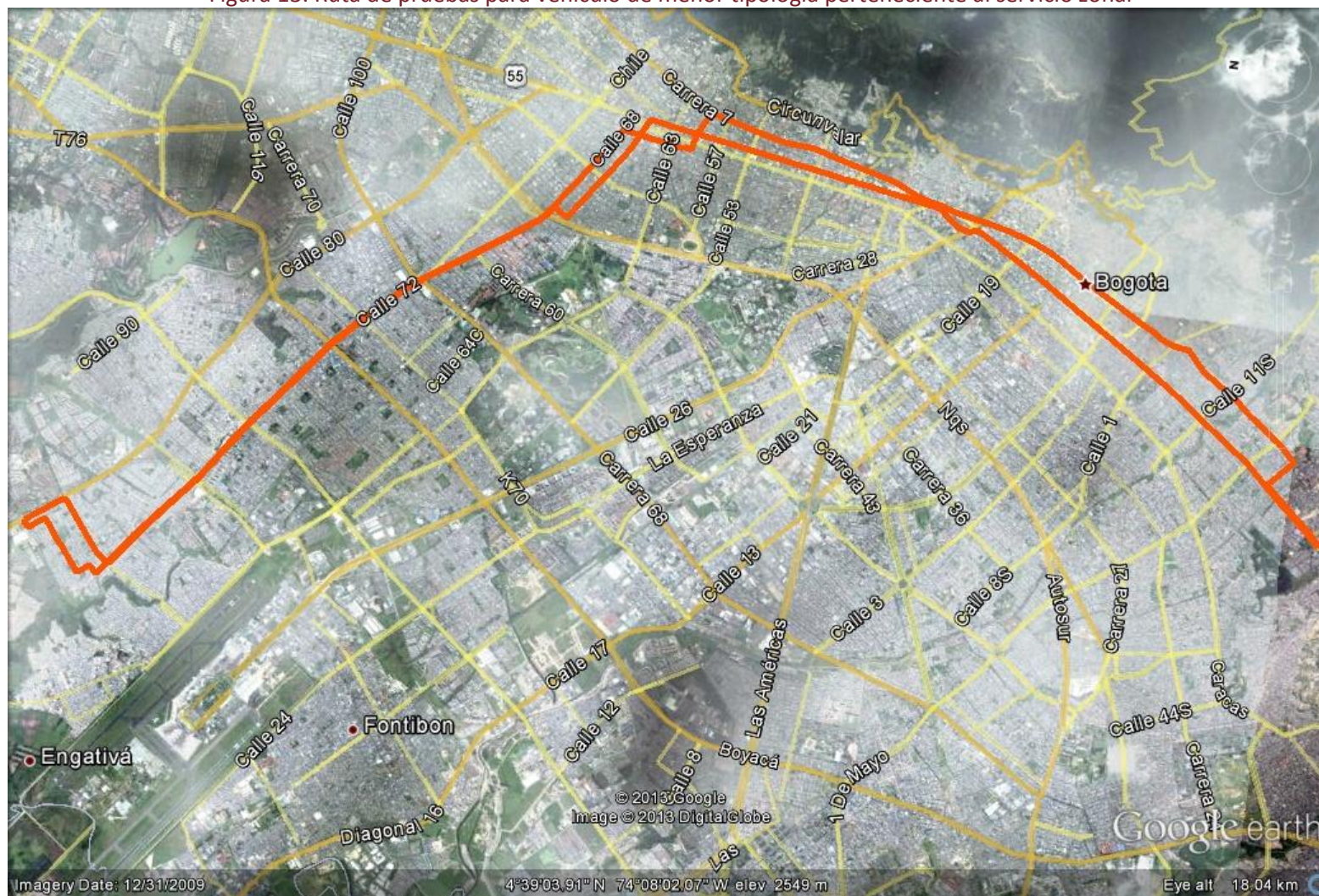
- Inicia desde la Calle 80 a la altura de la Carrera 114 sentido occidente – oriente.
- Se desplaza hasta la Calle 80, y luego toma la Calle 68 recorriendo la Carrera 110. Posteriormente toma la calle 68 hasta la localidad de Chapinero, recorriendo el sector conocido como 7 de Agosto por la Calle 66, después de la Carrera 13 hacia el sur se dirige a la Carrera 10 en el intercambiador de la calle 26 y recorre esta vía hacia el sur hasta llegar al barrio 20 de julio.
- Regresa siguiendo la misma ruta. Cuando viaja de sur a norte por la Carrera 7, llega hasta la Calle 60, toma la Carrera 17 y va hasta la Avenida 68. Allí toma hacia el occidente por la Calle 68, se dirige hasta la Calle 112 para posteriormente llegar al lugar de partida.

La ruta de la Figura 13 describe la ruta para consumo y emisiones, se detiene en cada uno de los paraderos oficiales de la ruta, las cuales en una operación normal pueden fluctuar en función del requerimiento por parte de los pasajeros. Por tal motivo se totalizan ochenta (80) paradas durante cada recorrido de la ruta. La ruta descrita caracterizada por el alto flujo vehicular y la difícil circulación mantiene una velocidad promedio inferior a los 10 km/h.

A continuación se visualiza el perfil de elevación de la ruta seleccionada (Figura 14).

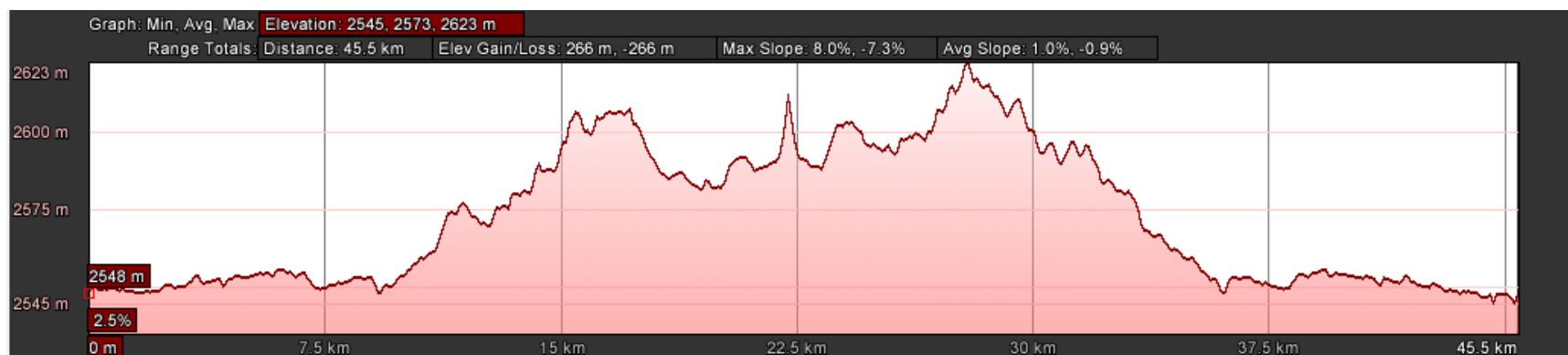


Figura 13. Ruta de pruebas para vehículo de menor tipología perteneciente al servicio zonal



Fuente: Elaboración propia utilizando la aplicación Google Earth®.

Figura 14. Perfil de elevación para ruta del vehículo de menor tipología perteneciente al servicio zonal



Fuente: Elaboración propia utilizando la aplicación Google Earth®.

## 2.3 Características de manejo

Se debe realizar muestreos al combustible empleado para cada prueba, bien sea de emisiones o de consumo, al inicio de cada prueba se debe tomar una muestra para ser analizada con posterioridad en un laboratorio autorizado por la Superintendencia de Industria y Comercio y certificado por un organismo acreditado por la UNAC.

## 2.4 Medición del consumo de combustible por pasajero

La relación entre la capacidad de cada vehículo para transportar pasajeros, su consumo de combustible y el valor promedio del combustible se considera en este aparte. Por efectos prácticos se considera exclusivamente el valor del combustible; otros aspectos importantes y referentes al costo de operación del vehículo como parqueadero, mantenimiento general, mantenimiento correctivo, tienden a mantenerse constantes en función de las capacidades de cada vehículo.

Las capacidades de los vehículos están diseñados según el fabricante; es así que los buses implementados en el servicio zonal padrones tienen una capacidad máxima de 80 pasajeros, y los de servicio troncal tales como los articulados tienen una capacidad máxima de 150 pasajeros, 40 sentados y 110 de pie, así mismo los buses biarticulados tienen una capacidad máxima de 250 pasajeros, 60 sentados y 190 de pie.

De acuerdo a lo anterior se debe realizar un análisis de eficiencia en los vehículos donde se relacione el promedio de consumo de combustible por pasajero en un kilómetro, teniendo en cuenta el peso promedio de pasajero (68Kg), de tal modo que se obtenga el valor en función de los kilómetros recorridos.

## 2.5 Medición del consumo de combustible por tipología

### 2.5.1 Vehículos tipo padrón de servicio zonal

- Mediciones en ruta

Para la medición de los consumos de combustible en ruta para los vehículos tipo padrón de servicio zonal de manera directa, se debe instalar un tanque externo en todos los vehículos. El tanque externo es pesado antes y después de cada recorrido, y junto con los kilómetros recorridos y la información aportada por el GPS, permite calcular el consumo específico para cada vehículo. Para el caso de los vehículos a gas natural comprimido (GNC), se reportan las presiones del tanque de combustible antes y después del recorrido para calcular los metros cúbicos normalizados de gas consumidos durante la prueba, y, mediante el poder calorífico del gas natural reportado se estima el diesel equivalente.

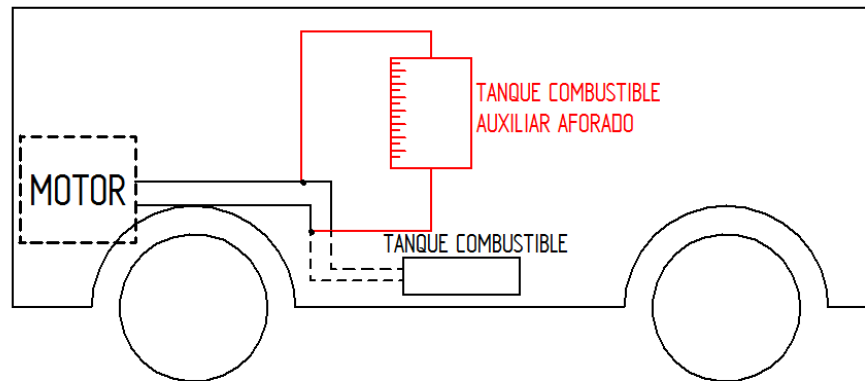
- Balance de carbono

A partir de los resultados en emisiones obtenidos se puede calcular el consumo de combustible por medio de un balance de carbono.

## 2.5.2 Vehículos articulados y biarticulados del servicio troncal

En la medición del consumo de combustible en los buses articulados y biarticulados del servicio troncal, la medición directa demanda la instalación de un tanque externo, véase Figura 15. No obstante, en estos casos resulta oportuno usar flujómetros de combustible para obtener mediciones directas.

Figura 15. Esquema de conexión del tanque auxiliar aforado de combustible.



Fuente. Elaboración propia

## 2.5.3 Vehículo de menor tipología perteneciente al servicio zonal

De la misma forma que los vehículos del servicio troncal, el consumo de combustible en esta tipología, se debe determinar por medición directa lo que demanda la instalación de un tanque externo.

## 2.6 Determinación de la carga en el dinamómetro

Las pruebas de los vehículos en el dinamómetro requieren establecer una carga constante durante todo el ciclo. Para que las pruebas sean equitativas esta carga dependerá del peso de cada vehículo.

Para establecer el valor de esta carga, luego de montar el vehículo en el dinamómetro se opera a velocidad constante en la marcha que más se acerca a la relación 1:1 de forma que sea posible obtener la curva de potencia y par del motor. Para determinar esta marcha y el rango de revoluciones adecuado y obtener la potencia máxima se utiliza la información proveniente de las fichas técnicas de cada vehículo. Posteriormente la carga constante del dinamómetro que se fija representa un 30% de la potencia máxima de cada vehículo.

Una vez se establece la carga, se evalúa el vehículo con la menor relación peso-potencia y se toma como referencia para el resto de los vehículos. Para estimar la referencia, se relaciona el peso del vehículo con la menor potencia y se aplica un factor de corrección en función de la diferencia de pesos con los otros vehículos, esto si se desean medir varios vehículos de forma continúa.



El porcentaje mencionado con anterioridad (30%) representa la máxima carga admisible por el vehículo de menor potencia que le permita seguir los ciclos de manejo estipulados para las mediciones realizadas (Ciclo ciudad de Bogotá, FIGE y FTP) sin salirse de los rangos de tolerancia.

## 2.7 Adquisición de datos

### 2.7.1 Pre-procesamiento

Se debe organizar la información obtenida por los medidores de material particulado y demás equipos en formato de archivo Excel. Se debe asignar a cada vehículo medido un código y se debe clasificar de acuerdo con la nomenclatura preferida. Para cada vehículo se recopila el número de pruebas efectuadas y los archivos pre-procesados.

### 2.7.2 Procesamiento

El procesamiento para cada vehículo consiste en la integración de los reportes suministrados por los medidores de material particulado para la determinación del Material Particulado (PM) y los suministrados por los analizadores de gases para los Óxidos de Nitrógeno (NOx), Monóxido de Carbono (CO), Hidrocarburos Totales (THC) y Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>). La Figura 16, describe el paso a paso en el procesamiento de los factores de emisión.

## 2.1 Cálculo de consumo de combustible por balance de carbono

Los reportes de los equipos de medición de material particulado (PM) y los de los analizadores de gases para Óxidos de Nitrógeno (NOx), Monóxido de Carbono (CO), Hidrocarburos Totales (THC) y Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>), permiten determinar el consumo de combustible por balance de carbono. La Tabla 4 describe las unidades reportadas por los analizadores.

**Tabla 4. Unidades de los reportes suministrados por los analizadores**

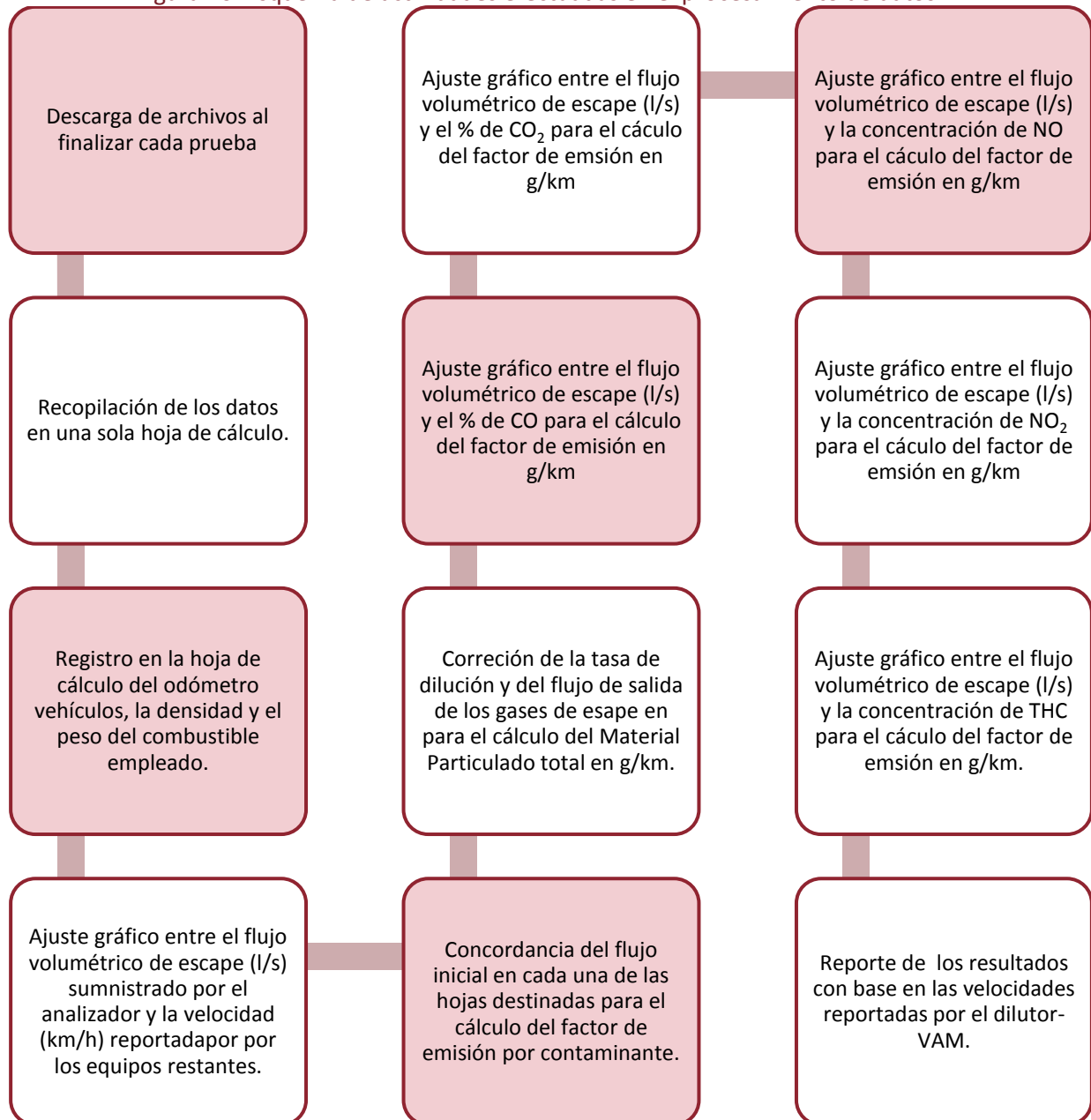
Emisiones	Unidades
Material Particulado (PM)	(ug/m <sup>3</sup> )
Monóxido de Nitrógeno (NO),	%
Dióxido de Nitrógeno (NO <sub>2</sub> )	ppm
Monóxido de Carbono (CO)	%
Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> )	%
Hidrocarburos Totales (THC)	ppm

Fuente: Elaboración propia

Realizada la conversión de las emisiones a gramos por segundo (g/s), se determina la respectiva fracción de masa de carbón para los Óxidos de Carbono (COx) medidos. El cálculo consiste en la multiplicación de las mediciones de CO por un factor de 12/28 (fracción de masa de carbón en una molécula de CO) y de las mediciones de CO<sub>2</sub> por 12/44 (fracción de masa de carbón en una molécula de CO<sub>2</sub>). Como la fracción másica de carbono en forma de Compuestos Orgánicos Volátiles (COV) sin quemar es muy pequeña

comparada con las mediciones de los Óxidos de Carbono (COx), se incluyen las mediciones de hidrocarburos totales en la suma de los resultados de CO y CO<sub>2</sub> para la obtención de la emisión de carbono total segundo a segundo. Después las emisiones totales de carbono se multiplican por un factor de 13,85/12,0 (composición de CH<sub>1.85</sub>) para conseguir la cantidad de combustible empleado en unidades másicas.

Figura 16. Esquema de actividades efectuadas en el procesamiento de datos



Fuente: Elaboración propia

Tabla 5. Fracciones de masa de carbón en algunos combustibles

Combustible	Fracción másica
Diesel y Gasolina	0,867%
Gas Natural	0,76%
Gas L.P	0,82

Fuente: Engine, Fuel and Emissions Engineering, Inc., 2006.

La cantidad de combustible empleado por kilómetro (g/km) durante cada una de las pruebas en ruta se estima dividiendo el peso del combustible entre la distancia total reportada directamente de la unidad VAM. Por efectos de conversión y considerando la densidad del combustible empleado (resultados de laboratorio), se debe reportar de manera adicional en kilómetros por litro (km/L).

## 2.2 Cálculo equivalencia energética entre tecnologías

Al momento de comparar la eficiencia energética de distintas tecnologías de buses o de vehículos en general se hace indispensable conocer la equivalencia energética entre las unidades de consumo que se miden directamente en las pruebas.

Para un vehículo diesel convencional el consumo se mide en galones o en kilogramos de diesel por unidad de distancia recorrida, para el caso del vehículo híbrido-diesel el consumo se mide en galones o kilogramos de diesel por unidad de distancia recorrida además del cambio en el nivel de carga del RESS, para el caso de un vehículo eléctrico se mide el consumo en KWh por unidad de distancia recorrida y para el caso de los vehículos a gas se mide la presión en el tanque de combustible, pero la presión en sí misma no representa una unidad de energía, por lo tanto se requiere conocer la curva de carga del tanque que relacione los metros cúbicos normalizados de combustible por unidad de presión.

A continuación se detalla la metodología a emplear para calcular las equivalencias en consumos entre estas tecnologías alternativas y un bus diesel convencional.

### 2.2.1 Entre vehículo híbrido-diesel y diesel convencional

Para entender la equivalencia energética en consumo entre un vehículo híbrido y un vehículo diesel convencional es necesario aclarar algunos conceptos importantes.

Un vehículo híbrido es aquel que combina dos o más tipos de energía para movilizarse. Para los buses tipo padrón, los tipos de energía más frecuentes que se combinan en los vehículos híbridos son el diesel convencional y la energía eléctrica.

Los vehículos híbridos de forma general pueden operar en dos modos distintos. El primer modo es el modo de descarga, en esta modalidad el híbrido inicialmente se desplaza casi exclusivamente gracias a la energía eléctrica. El segundo modo de operación se denomina modalidad de carga sostenida, para este caso la carga en la batería se mantiene constante y el vehículo se moviliza gracias a la energía proveniente del combustible.



Para que el primer modo de operación sea representativo el vehículo híbrido debe ser del tipo “plug in”, es decir, que puede ser conectado a una fuente externa de energía eléctrica para cargar las baterías. Esto es más común en vehículos de uso particular, puesto que en vehículos de transporte público el peso y espacio necesario para alojar los sistemas de almacenamiento de energía serían excesivos amenazando la conveniencia del vehículo para su propósito principal de transportar una determinada cantidad de personas.

Para el caso de los vehículos de transporte público el modo de operación principal es el de carga sostenida, es decir que el diesel se convierte en la fuente primaria de energía, mientras la energía eléctrica es el resultado de recuperar energía que previamente había suministrado el combustible pero que durante las frenadas podría ser desperdiciada, de este modo el vehículo frena con la ayuda de un generador eléctrico el cual almacena esta energía en una batería para posteriormente ser utilizada en los inicios de marcha del vehículo. De acuerdo a lo anterior, el tamaño de las baterías puede ser reducido puesto que su capacidad de almacenamiento es pequeña al estar constantemente cargándose y descargándose.

Si se tiene un vehículo híbrido sin necesidad de conexión directa a la red, la forma más correcta de realizar pruebas de consumo, eficiencia energética y de emisiones contaminantes, debe ser mediante una prueba de carga sostenida. Si se analiza un vehículo híbrido en fracciones de tiempo muy pequeños se observará que el concepto de carga sostenida no es muy claro porque en algunos instantes opera cargando y descargando la batería, pero si se analiza el vehículo para rangos más amplios se observará que la carga al inicio de la prueba y al final son iguales o al menos muy similares. Es necesario introducir el concepto de tolerancia energética (NEC), el cual define que tan cerca está el ciclo desarrollado de ser un ciclo en modo de carga sostenida (CS) aceptable.

Cuando se realiza un test completo, es decir que se involucra un periodo de descarga y de carga sostenida, el criterio NEC se hace muy útil porque permite mediante el análisis de periodos de tiempo representativos, establecer cuando el vehículo efectivamente opera en modo descarga, en modo transición o en modo de carga sostenida.

El criterio NEC se define matemáticamente como sigue:

$$\text{Tolerancia NEC: } \left| \frac{\text{Cambio Neto de Energía Batería}}{\text{Energía Total del Combustible}} \right| \leq 1\%$$

En un sentido físico la tolerancia NEC representa que tanta de la energía proveniente del combustible está siendo utilizada para mantener el nivel de carga del RESS (sistema de almacenamiento de energía) y cuanta se requiere para mover el vehículo. Para que el vehículo se encuentre en modo CS esta relación debe ser menor o igual al 1%.

Para dar alcance al presente estudio (donde RESS se refiere a la batería), el cálculo del NEC se puede realizar de la siguiente manera:

$$\text{Cambio Neto de Energía} = ((Ah)_{\text{final}} - (Ah)_{\text{inicial}}) * V_{\text{sistema}}$$

$$Energia\ Total\ del\ Combustible = NHV_{combustible} * m_{combustible}$$

$$(Ah_{final})_{max} = (Ah_{inicial}) + \frac{NHV_{combustible} * m_{combustible}}{V_{sistema} * K_1} * 0,01$$

$$(Ah_{final})_{min} = (Ah_{inicial}) - \frac{NHV_{combustible} * m_{combustible}}{V_{sistema} * K_1} * 0,01$$

$$-\frac{NHV_{combustible} * m_{combustible}}{V_{sistema} * K_1} * 0,01 \leq NEC \leq \frac{NHV_{combustible} * m_{combustible}}{V_{sistema} * K_1} * 0,01$$

NEC= Cambio neto de energía durante la prueba en unidades de Wh.

$(Ah_{final})_{max}$  = Carga máxima permitida en la batería, en unidades amperios-hora al final de la prueba.

$(Ah_{final})_{min}$  = Carga mínima permitida en la batería, en unidades amperios-hora al final de la prueba.

$(Ah_{inicial})$ = Carga de la batería en amperios-hora al inicio de la prueba.

$NHV_{combustible}$  = Poder calorífico neto en joules por kilogramo.

$m_{combustible}$  = Masa total de combustible consumida durante la prueba en kilogramos.

$V_{sistema}$  = Voltaje nominal DC de la batería en el caso de carga sostenida.

$K_1$  = Factor de conversión igual a 3600 s/h.

Para el caso de pruebas en modo descarga se requiere conocer la cantidad de energía almacenada en las baterías a partir de una fuente externa o conocer el cambio del estado de carga asociado al estado inicial de la prueba hasta el estado de carga estable o sostenida. Esta energía debe ser comparada con un equivalente de combustible diesel, para esto las Normas SAE J2711 y SAE J1711 v002 establecen una eficiencia de generación, la equivalente energética se realiza de acuerdo a la siguiente expresión:

$$FE_e = \{[(HV_{combustible}) * (E_G) * (E_T) * (E_C)] / [(EU) * K_3]\}$$

Donde:

$FE_e$  = Consumo de energía eléctrica en galones diesel equivalentes en MPG (Millas por galón).

$HV_{Combustible}$  = Poder calorífico inferior del combustible, para el diesel igual a 128.000 BTU/galón.

$E_G$  = Eficiencia generación igual al 35%.

$E_T$  = Eficiencia transmisión igual al 90%.

$E_C$  = Eficiencia de carga (considera además las pérdidas de carga de la batería) igual al 70%.

$E_U$  = Consumo de energía por vehículo en kWh por milla.

$K_3$  = Factor de conversión igual a 3412 [BTU/kWh].

Fuente: SAE J2711, 2010.