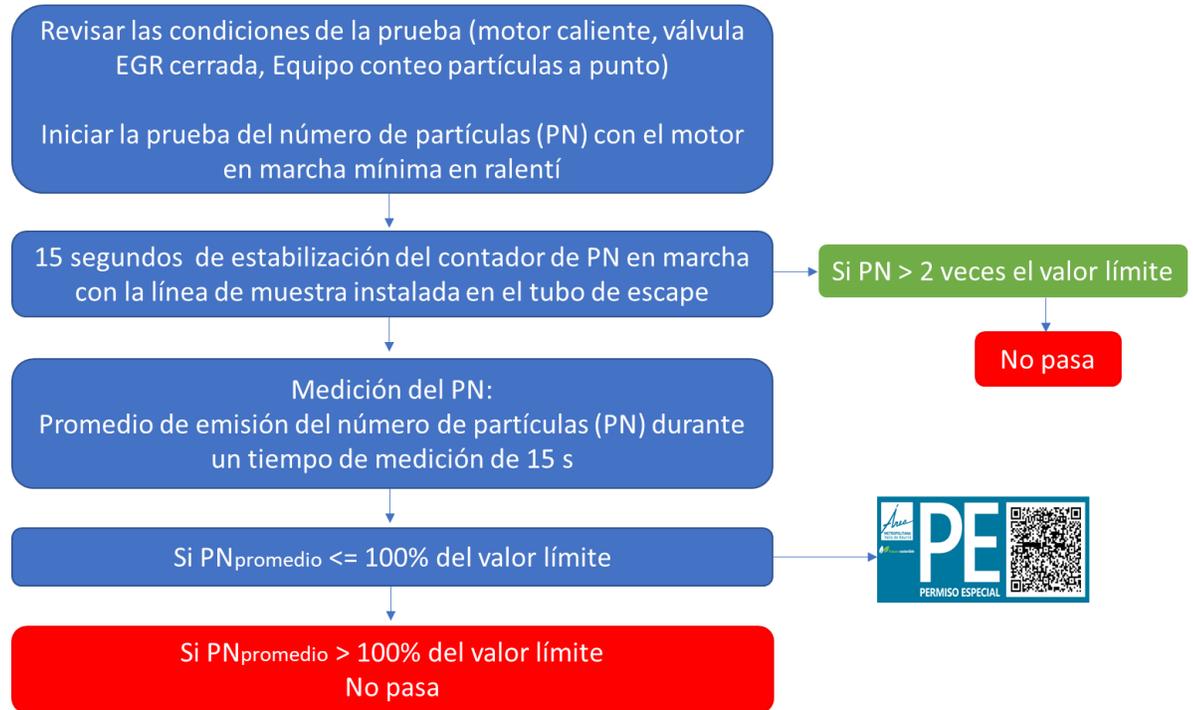


DESARROLLO DE UN NUEVO PROCEDIMIENTO DE INSPECCIÓN TÉCNICA PERIÓDICA DE VEHÍCULOS DIÉSEL PARA EL ÁREA METROPOLITANA DEL VALLE DE ABURRÁ BASADA EN EL NÚMERO DE PARTÍCULAS (ITP 2020)



John Ramiro Agudelo Santamaría
Grupo de Manejo Eficiente de la Energía (GIMEL)
Universidad de Antioquia
Medellín



Área Metropolitana del Valle de Aburrá

Director Juan David Palacio Cardona
Subdirectora Ambiental Ana María Roldán Ortiz
Carrera 53 No. 40A – 31
Medellín
(57-4) 385 60 00

DESARROLLO DE UN NUEVO PROCEDIMIENTO DE INSPECCIÓN TÉCNICA PERIÓDICA DE VEHÍCULOS DIÉSEL PARA EL ÁREA METROPOLITANA DEL VALLE DE ABURRÁ BASADA EN EL NÚMERO DE PARTÍCULAS (ITP 2020)

Ejecutan:



John Ramiro Agudelo Santamaría
Grupo de Manejo Eficiente de la Energía (GIMEL)
Universidad de Antioquia
<http://www.udea.edu.co>

Un proyecto de:



Área Metropolitana del Valle de Aburrá

Director Juan David Palacio Cardona
Subdirectora Ambiental Ana María Roldán Ortiz
Carrera 53 No. 40A – 31
Medellín
(57-4) 385 60 00
<http://www.metropol.gov.co>

Convenio Interadministrativo de Asociación No. 686 de 2020

Créditos

Desarrollo de un nuevo procedimiento de inspección técnica periódica de vehículos diésel para el Área Metropolitana del Valle de Aburrá basada en el número de partículas (ITP 2020)

Convenio Interadministrativo de Asociación No. 686 de 2020

Un proyecto del Área Metropolitana del Valle de Aburrá
Juan David Palacio Cardona
Director

Ana María Roldán Ortiz
Subdirectora Ambiental

María Helena Gómez Gallo
Líder Programa Gestión Ambiental

Gloria Estela Ramírez Casas
Profesional supervisora del convenio

Ejecuta
Universidad de Antioquia
Grupo de Manejo Eficiente de la Energía

Ing.-Dr. John Ramiro Agudelo, Ing. Mecánico, (john.agudelo1@udea.edu.co)
Ing.-Dr. Andrés Felipe Agudelo, Ing. Mecánico
Ing.-Dr. Ricardo Moreno, Ing. Mecánico
Ing.-Dr. Carmen Elena Patiño, Ing. Mecánica
Ing.-Dr. Olga Cecilia Úsuga, Ing. Industrial
Ing. Jackeline Saldarriaga, Ing. Administrativa

Agradecimiento

Empresa TSI de Estados Unidos de América (USA) por facilitar al proyecto el equipo NPET 3795 HC

Revisó y Aprobó



John Ramiro Agudelo Santamaría

Director del proyecto
Profesor Dpto. Ingeniería Mecánica de la Universidad de Antioquia
Calle 67 No. 53-108. Bloque 19 1er. Piso Ala sur. Tel. (+574) 219 8547
Medellín – Colombia
Diciembre de 2020

**DESARROLLO DE UN NUEVO PROCEDIMIENTO DE INSPECCIÓN TÉCNICA PERIÓDICA DE VEHÍCULOS
DIÉSEL PARA EL ÁREA METROPOLITANA DEL VALLE DE ABURRÁ BASADA EN EL NÚMERO DE
PARTÍCULAS (ITP 2020)**

INFORME FINAL

Preparado para

ÁREA METROPOLITANA DEL VALLE DE ABURRÁ

Convenio Interadministrativo de Asociación No. 686 de 2020



**UNIVERSIDAD
DE ANTIOQUIA**

1 8 0 3

Por:

John Ramiro Agudelo

Profesor Departamento Ingeniería Mecánica

Medellín

15 de diciembre de 2020

Universidad de Antioquia
Grupo de Manejo Eficiente de la Energía
Laboratorio de Máquinas Térmicas
Calle 67 No. 53-108. Bloque 19 1er. Piso Ala sur. Tel. (+574) 219 8547
Medellín - Colombia

Desarrollo de un nuevo procedimiento de inspección técnica periódica de vehículos diésel para el Área Metropolitana del Valle de Aburrá basada en el número de partículas (ITP 2020)

INFORME FINAL

Convenio Interadministrativo de Asociación No. 686 de 2020
Preparado para ÁREA METROPOLITANA DEL VALLE DE ABURRÁ

Diciembre de 2020

Responsable

John Ramiro Agudelo Santamaría
Profesor Dpto. Ingeniería Mecánica Universidad de Antioquia

Investigadores

Ing.-Dr. Andrés Felipe Agudelo Santamaría, Profesor Dpto. Ingeniería Mecánica Universidad de Antioquia
Ing.-Dr. Ricardo Moreno Sánchez Profesor Dpto. Ingeniería Mecánica Universidad de Antioquia
Ing.-Dr. Olga Cecilia Úsuga Manco Profesora Dpto. Ingeniería Industrial Universidad de Antioquia
Ing.-Dr. Carmen Elena Patiño Rodríguez Profesora Dpto. Ingeniería Industrial Universidad de Antioquia

Equipo Técnico

Jackeline Saldarriaga	María Luisa Botero Vega
Carlos Mateo Vélez Rodríguez	Leonardo Serna Torres
Javier David Londoño Echeverri	Juan Sebastián Vásquez Alzate
Fernando Cardeño López	Oscar David Hincapié

Revisó y Aprobó



John Ramiro Agudelo Santamaría

TABLA DE CONTENIDO

1. Resumen ejecutivo	1
2. Agradecimientos.....	4
3. Introducción.....	5
4. Alcance 1: campaña de medición de número de partículas	6
CONSOLIDADO SEGUNDA MEDICIÓN	9
MEJORAS REPORTADAS EN VEHICULOS QUE ASISTIERON A SEGUNDA MEDICIÓN	11
5. Alcance 2: Verificación del tiempo de validez de la prueba de conteo de partículas.....	13
6. Alcance 3: Validez de los umbrales de número de partículas.....	19
7. Alcance 4: Protocolo para la nueva prueba de inspección técnica de vehículos diésel basada en el conteo de partículas	31
Agendamiento de vehículos de prueba	31
Ingreso de vehículos a la zona de pruebas	33
Montaje de la Sonda	35
Equipo de prueba de emisiones de número de partículas.....	35
Registro en la base de datos (Excel)	39
Registro en <i>App</i> del Área Metropolitana y entrega de distintivo.....	40
8. Alcance 5: Gestión del conocimiento	42
9. Alcance 6: Aplicativo de Análisis Modal de Emisiones Vehiculares (AMEV).....	45

1. RESUMEN EJECUTIVO

El Área Metropolitana del Valle de Aburrá en su búsqueda por armonizar la mejor calidad del aire para los habitantes de la región, sin afectar la actividad económica de importancia tan significativa como es el sector de transporte de carga, se ha unido con la Universidad de Antioquia para desarrollar una nueva prueba piloto, voluntaria, gratuita y que no supone ningún tipo de sanción, sino por el contrario, un beneficio para aquellos vehículos que por su buen estado técnico-mecánico, reflejado en su baja emisión de material particulado. Para tal fin, ambas entidades firmaron el convenio interadministrativo No. 686 de 2020, cuyo objeto consistió en *“Aunar esfuerzos para el desarrollo de un nuevo procedimiento de inspección técnica periódica de vehículos diésel para el área metropolitana del valle de Aburrá basada en el número de partículas”*. Este convenio surgió como continuación natural de la segunda ampliación del convenio 888 de 2017, en el marco del cual se realizó el primer piloto de distintivos ambientales por concentración en número de partículas llevado a cabo en Colombia.

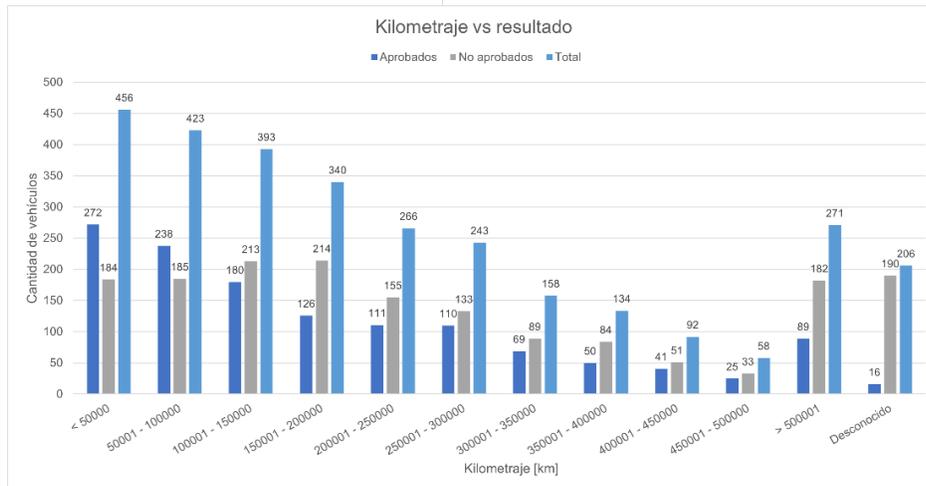
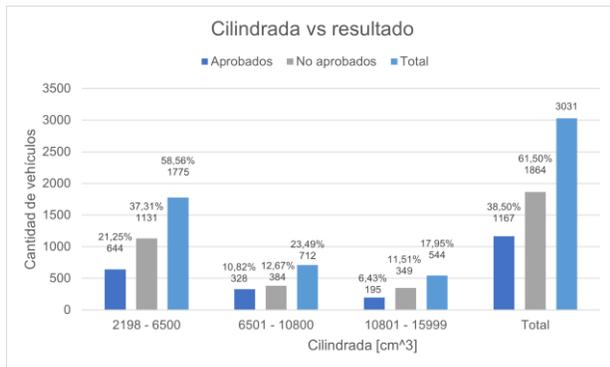
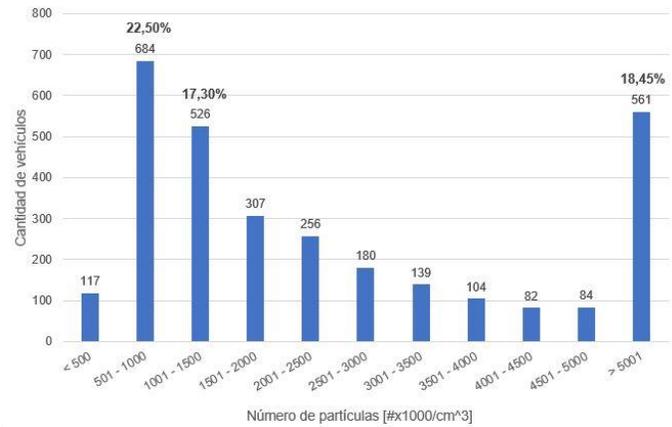
La finalidad del AMVA consiste en exonerar de restricción de movilidad a vehículos diésel de carga de la región del Valle de Aburrá en períodos de episodios críticos de calidad de aire contemplados en el POECA. En el primer piloto, realizado entre el 8 de agosto y el 30 de septiembre de 2019, se llevaron a cabo 1547 mediciones a vehículos diesel de carga. En esa ocasión se contó con el apoyo de la empresa Colombiana de Petróleos (Ecopetrol). De éstos, 772 (49.9 %) fueron aprobados, al tener un valor menor al umbral establecido de 2'000.000 #/cm³.

El convenio 686 de 2020 tuvo los siguientes alcances, a los cuales se les dio cabal cumplimiento:

1. Realizar una campaña de pruebas basada en el criterio de concentración del número de partículas (PN), para implementación de distintivos ambientales a vehículos diésel de carga, que los exima de la restricción de movilidad en períodos de episodios críticos de calidad de aire.

Los resultados de este alcance se resumen gráficamente a continuación. Se presentaron 3040 vehículos, de los cuales aprobó el 43.7%, es decir 1327 vehículos. De éstos, 801 (26.3%) aprobó con menos de 1'000.000 de #/cm³. Se comprobó que el mayor número de vehículos que aprobaron el umbral de 1'500.000 #/cm³ utilizado para incentivar con el distintivo ambiental en este nuevo piloto del año 2020, corresponde a aquellos de año de modelo superior a 2016, independientemente de su cilindraje de motor y del kilometraje registrado. No obstante, una vez más, se evidenció que un vehículo de última tecnología en el mercado nacional, certificado con estándar de emisiones Euro IV o Euro V, modelo 2021, no necesariamente cumplieron con el umbral de número de partículas de este piloto. Después de hacer un seguimiento detenido a esta situación, se logró identificar con un ensamblador de la región, que la calibración adecuada de la electrónica del vehículo, unido a un sistema acertado de tratamiento de gases de escape, pueden llevar a lograr el objetivo de vehículos de baja contaminación por material particulado.

Total de vehículos	
Agendados	3775
Medidos	3040 (80,5 %)
Aprobados	1327 (43,7 %)
Rechazados	1713 (56,3 %)



2. Verificar el tiempo de validez de la prueba de conteo de partículas mediante comparación de los resultados de esta nueva campaña de medición, frente a la realizada en el segundo semestre de 2019.

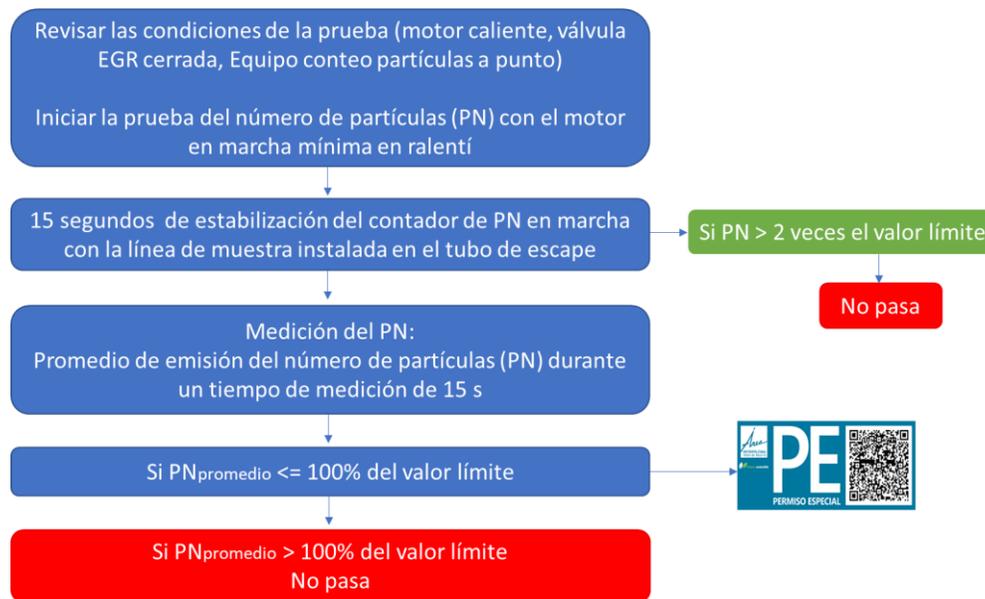
Al comparar los resultados del número de partículas de los vehículos que habían aprobado en 2019, que se volvieron a medir en 2020, se encontró que la tasa de aprobación se redujo a 61%, lo que llevó al grupo ejecutor a recomendar como tiempo de validez del distintivo de 6 meses.

3. Revisar la validez de los umbrales de número de partículas establecidos en la prueba piloto anterior, y redefinirlos para esta segunda campaña de medición bajo el estudio de diferentes escenarios provenientes del análisis de la base de datos de los resultados de los dos pilotos.

Tras hacer un análisis estadístico basado en árboles de decisión, y en el valor porcentual intercuartílico (diagrama de cajas y bigotes), se encontró que más del 75% de los vehículos que habían aprobado en 2019 emitieron menos de 1'500.000 #/cm³, independientemente de su cilindraje, año del modelo y kilometraje recorrido. Por esta razón, para el piloto del año 2020 se utilizó dicho valor como umbral para hacerse acreedor al distintivo ambiental.

- Definir la metodología (protocolo) idónea para la nueva propuesta de inspección técnica periódica de vehículos diésel para el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, basada en la concentración del número de partículas (PN).

Se presenta un protocolo detallado para realizar la prueba de conteo de partículas:



- Gestionar el conocimiento acumulado durante estas pruebas, de modo que los actores público-privados interesados se beneficien de los resultados, y pueda ser replicada de forma repetitiva mediante el protocolo desarrollado en el numeral anterior.

Se realizó un curso de capacitación que contó con la participación de más de 100 asistentes en promedio. Las memorias del curso, así como las grabaciones, están disponibles en la biblioteca del micro-sitio web de calidad del aire, de la página del AMVA: <https://www.metropol.gov.co/ambiental/calidad-del-aire/Paginas/Biblioteca-aire.aspx>

- Entrega y entrenamiento en el uso de un modelo para estimación de factores de emisión, basado en el Análisis Modal de Emisiones vehiculares, desarrollado por la Universidad de Antioquia, para evaluar escenarios de reducción de emisiones vehiculares.

Se desarrolló la App AMEV (Análisis modal de emisiones vehiculares), la cual permite estimar factores de emisión introduciendo recorridos que son registrados vía GPS del teléfono celular.

2. AGRADECIMIENTOS

El grupo ejecutor agradece sinceramente a la empresa estadounidense TSI, ubicada en Minnesota (USA), por facilitar para la ejecución del proyecto el equipo NPET 3795 HC de conteo de partículas por condensación.

A las empresas FOTON y Coordinadora Mercantil por facilitarnos vehículos para las pruebas repetibilidad.

A las empresas ENVÍA y Daimler de Colombia, por facilitarnos vehículos para las prácticas del curso de capacitación.

A Robert Fraser y Juan Carlos Valdivia de la empresa Purexhaust (Chile), por su amable participación con el tema de sistemas de re-equipamiento con filtros de partículas diésel durante el curso de capacitación realizado en el marco del convenio 686 de 2020.

Agradecemos la confianza que ha tenido el Área Metropolitana del Valle de Aburrá en nuestro trabajo desde la Universidad de Antioquia, en el que hemos cristalizado la tríada Universidad-Empresa-Estado en beneficio de nuestra región.

Muchas gracias a todo el equipo de trabajo, quienes desde sus diferentes roles mostraron su compromiso decidido para sacar adelante y con éxito un proyecto cuyos alcances e impactos trascienden las fronteras del país. Con gran aprecio a ustedes, quienes arriesgaron tanto en la ejecución de este proyecto en medio de los momentos más críticos y dolorosos de la pandemia del Covid-19 en nuestro país. Vanessa y Mateo nos tuvieron pensando, por fortuna lo superaron.

Estamos y seguiremos comprometidos en generar cultura ciudadana para mejorar la calidad del aire de nuestra región en armonía con el desarrollo económico, teniendo como norte la sostenibilidad. Si la opacidad no sirve, en el conteo de partículas vemos una alternativa robusta y confiable como prueba de inspección técnica periódica de vehículos diésel en la región y en el país.

Con sincero agradecimiento,



John Ramiro Agudelo
Profesor Dpto. Ingeniería Mecánica
Facultad de Ingeniería
Universidad de Antioquia

3. INTRODUCCIÓN

Este documento contiene el informe final correspondiente al convenio interadministrativo No. 686 de 2020 suscrito entre el Área Metropolitana del Valle de Aburrá y la Universidad de Antioquia, cuyo objeto consistió en “*Aunar esfuerzos para el desarrollo de un nuevo procedimiento de inspección técnica periódica de vehículos diésel para el área metropolitana del valle de Aburrá basada en el número de partículas*”. Este convenio surgió como continuación natural de la segunda ampliación del convenio 888 de 2017, en el marco del cual se realizó el primer piloto de distintivos ambientales por concentración en número de partículas llevado a cabo en Colombia, cuya finalidad consistió en exonerar de restricción de movilidad a vehículos diésel de carga de la región del Valle de Aburrá en períodos de gestión de episodios de contaminación atmosférica contemplados en el POECA. En el primer piloto, realizado entre el 8 de agosto y el 30 de septiembre de 2019, se llevaron a cabo 1547 mediciones a vehículos diesel de carga. En esa ocasión se contó con el apoyo de la empresa Colombiana de Petróleos (Ecopetrol). De éstos, 772 (49.9 %) fueron aprobados, al tener un valor menor al umbral establecido de 2’000.000 #/cm³. El número de vehículos rechazados fue de 775 (50.1 %).

El convenio 686 de 2020 tuvo los siguientes alcances, a los cuales se les dio cabal cumplimiento:

1. Realizar una campaña de pruebas basada en el criterio de concentración del número de partículas (PN), para implementación de distintivos ambientales a vehículos diésel de carga, que los exima de la restricción de movilidad en períodos de episodios críticos de calidad de aire.
2. Verificar el tiempo de validez de la prueba de conteo de partículas mediante comparación de los resultados de esta nueva campaña de medición, frente a la realizada en el segundo semestre de 2019.
3. Revisar la validez de los umbrales de número de partículas establecidos en la prueba piloto anterior, y redefinirlos para esta segunda campaña de medición bajo el estudio de diferentes escenarios provenientes del análisis de la base de datos de los resultados de los dos pilotos.
4. Definir la metodología (protocolo) idónea para la nueva propuesta de inspección técnica periódica de vehículos diésel para el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, basada en la concentración del número de partículas (PN).
5. Gestionar el conocimiento acumulado durante estas pruebas, de modo que los actores público-privados interesados se beneficien de los resultados, y pueda ser replicada de forma repetitiva mediante el protocolo desarrollado en el numeral anterior.
6. Entrega y entrenamiento en el uso de un modelo para estimación de factores de emisión, basado en el Análisis Modal de Emisiones vehiculares, desarrollado por la Universidad de Antioquia, para evaluar escenarios de reducción de emisiones vehiculares.

Por facilidad para el lector, se ha organizado este informe por capítulos separados, en orden según cada alcance enumerado arriba, dando lugar a seis capítulos y una serie de Anexos que respaldan la información/resultados detallados de cada alcance, y que se encuentran al final del documento.

4. ALCANCE 1: CAMPAÑA DE MEDICIÓN DE NÚMERO DE PARTÍCULAS

Las Tablas 1.1 y 1.2 presentan los resultados generales del número de vehículos a los que se les realizó el conteo de partículas (Tabla 1.1) y por año del modelo del vehículo para las dos mediciones de conteo de partículas realizadas en el piloto 2020, correspondientes a primera y segunda medición. La segunda medición se realizó a aquellos vehículos que voluntariamente quisieran volver a realizar la prueba de conteo de partículas. La segunda campaña de pruebas de número de partículas, se realizó entre el 14 de septiembre y el 30 de noviembre de 2020. A diferencia de la anterior, realizada en el segundo semestre de 2019, en la actual se le dio la oportunidad de realizar una segunda medición a aquellos vehículos que no aprobaron en la primera oportunidad.

En esta segunda campaña de mediciones, se impuso un nuevo **umbral de 1.500.000 #/cm³** como criterio de aprobación. En el Alcance # 3 de este informe se revisa el origen de este valor límite para el año 2020.

Primera medición	
Agendados	3399
Medidos	2715 (79,9 %)
Aprobados	1200 (44,2 %)
Rechazados	1515 (55,8 %)
Segunda medición	
Agendados	376
Medidos	325 (86,4 %)
Aprobados	127 (39,1 %)
Rechazados	198 (60,9 %)
Total Acumulado	
Agendados	3775
Medidos	3040 (80,5 %)
Aprobados	1327 (43,7 %)
Rechazados	1713 (56,3 %)

Primera medición		Segunda medición
modelo < 2000		
Total	239 (8,8 % del total)	54 (16,6 % del total)
Aprobados	25 (10,5 %)	4 (7,4 %)
Rechazados	214 (89,5 %)	50 (92,6 %)
2001 < modelo < 2015		
Total	1542 (56,8 % del total)	161 (49,54 % del total)
Aprobados	569 (36,9 %)	49 (30,4 %)
Rechazados	973 (63,1 %)	112 (69,6 %)
2016 < modelo < 2019		
Total	604 (22,3 % del total)	95 (29,23% del total)
Aprobados	372 (61,6%)	62 (65,3 %)
Rechazados	232 (38,4%)	33 (34,7 %)
modelo > 2020		
Total	330 (12,2% del total)	15 (4,6 % del total)
Aprobados	234 (70,9%)	12 (80 %)
Rechazados	96 (29,1%)	3 (20 %)
Total = 2715 vehículos		Total = 325 vehículos

Las mediciones arrojaron que **1327 vehículos**, es decir el **43.7%** del total que se midieron, aprobaron el valor límite, y por tanto se hicieron acreedores al distintivo ambiental que los exonera de las restricciones de movilidad por episodios críticos de calidad del aire contemplados en el POECA, y que según se muestra en el Alcance # 2 de este informe, tiene una **validez de 6 meses**.

La mayor tasa de aprobación la obtuvieron vehículos modelo 2020 y 2021, (246 vehículos de 345 medidos para estas categorías). Al igual que en el primer piloto llevado a cabo en 2019, se detectó una vez más, que vehículos nuevos que hayan registrado su ingreso al país certificando normas de emisiones Euro IV o Euro V, no necesariamente aprueban el límite mínimo de 1.500.000 #/cm³. Esto se discutió en el Informe final del convenio 888 de 2017, y obedece normalmente a la falta de correcta calibración de la electrónica de los

vehículos. En la Figura 1.1 se muestra gráficamente el resultado de la concentración del número de partículas al ralenti caliente de los vehículos en función del año del modelo.

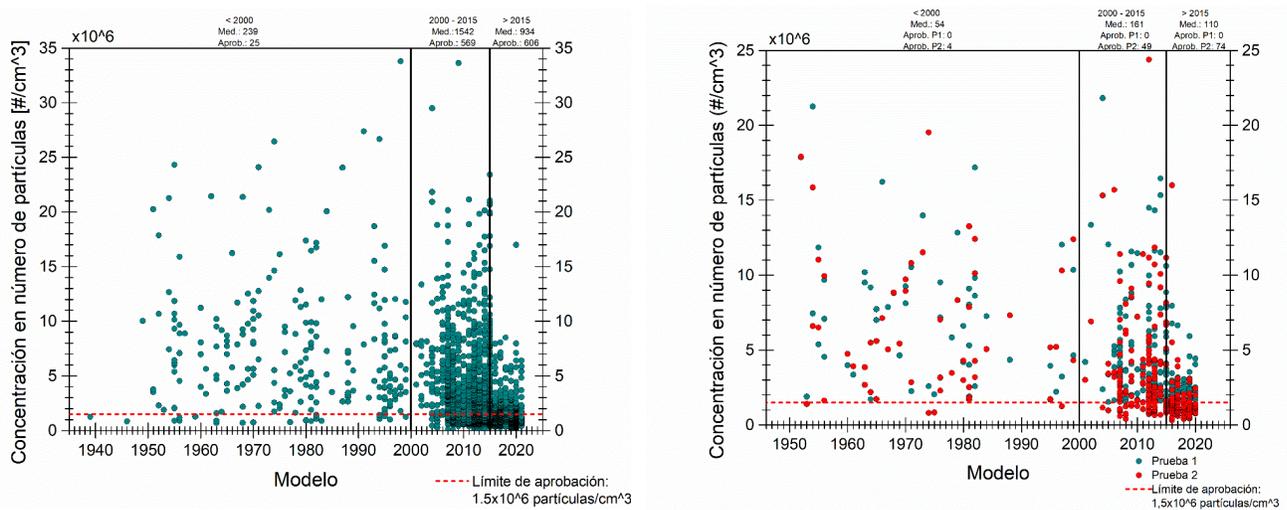


Figura 1.1. Concentración de número de partículas ($\#/cm^3$) por modelo del vehículo. *Izquierda*: todos los vehículos medidos. *Derecha*: Comparación de los que no pasaron en la primera oportunidad y se presentaron a segunda medición, los puntos verdes representan el resultado de la primera medición, y los puntos rojos los de la segunda medición.

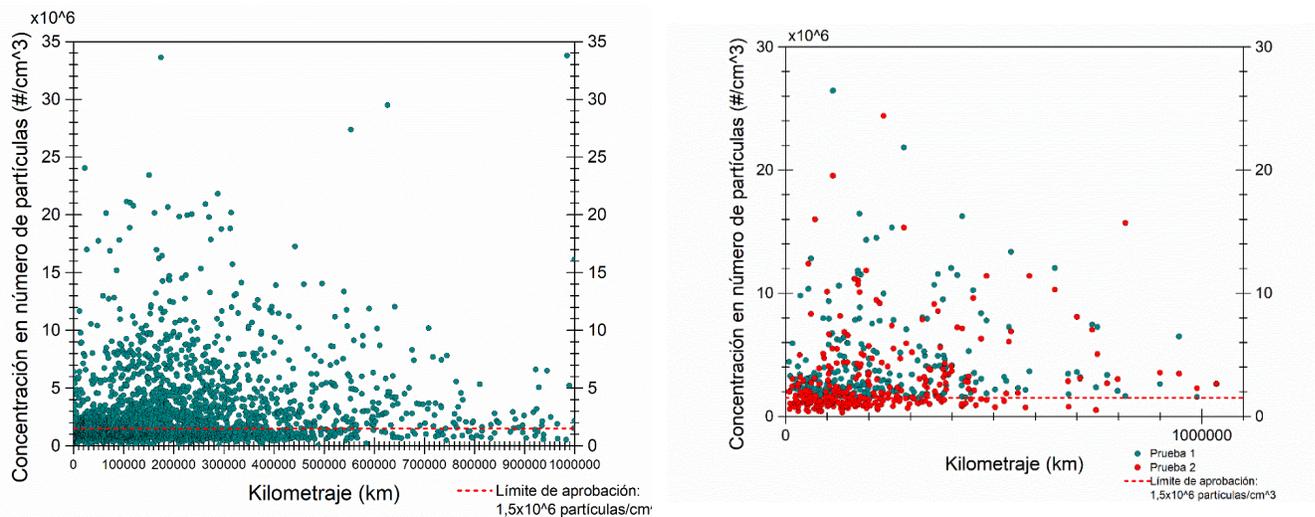


Figura 1.2. Concentración de número de partículas ($\#/cm^3$) por kilometraje. *Izquierda*: todos los vehículos medidos. *Derecha*: Comparación de los que no pasaron en la primera oportunidad y se presentaron a segunda medición, los puntos verdes representan el resultado de la primera medición, y los puntos rojos los de la segunda medición. Los vehículos con menos kilometraje tuvieron mayor tasa de aprobación en la segunda medición.

Tabla 1.3. Resultados por cilindrada del motor					
Primera Medición					
[cm ³] x 1000	A	A (%)	N.A.	N.A. (%)	Total
2.5 – 6.5	554	35,7	999	64,3	1553
6.5 – 10.8	305	48,2	328	51,8	633
10.8 - 16	181	34,7	341	65,3	522
Total	1040	38,4	1668	61,6	2708
Segunda Medición					
2.5 – 6.5	90	40,5	132	59,5	222
6.5 – 10.8	23	29,1	56	70,9	79
10.8 - 16	14	63,6	8	36,4	22
Total	127	39,3	196	60,7	323

A = Aprobados; N.A. = No Aprobados

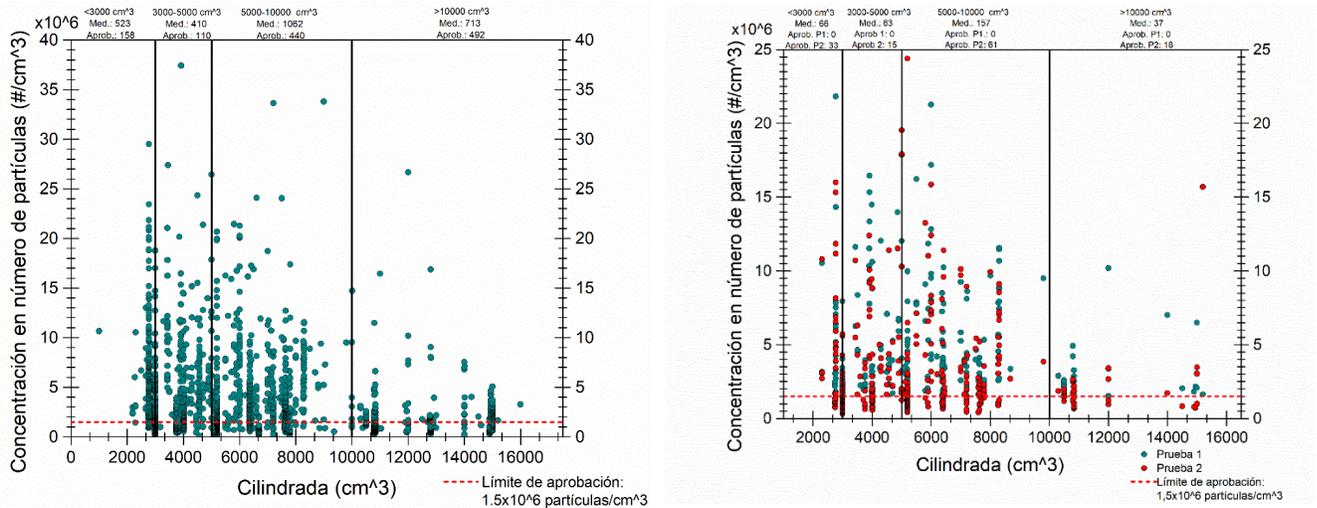


Figura 1.3. Concentración de número de partículas ($\#/cm^3$) por cilindrada. *Izquierda*: todos los vehículos medidos. *Derecha*: Comparación de los que no pasaron en la primera oportunidad y se presentaron a segunda medición, los puntos verdes representan el resultado de la primera medición, y los puntos rojos los de la segunda medición, en la cual aprobaron indistintamente del valor de cilindrada.

En la Tabla 1.3 se presentan los datos del número de vehículos y el porcentaje de aprobación/no- aprobación en función de la cilindrada, mientras que en la Figura 1.3 se muestra gráficamente los valores de concentración del número de partículas emitidas al ralentí caliente por los vehículos en función de su cilindrada de motor. Se comprueba que no existe una tendencia del número de partículas (NP) con este parámetro (Tabla 1.3), lo que garantiza que mientras el vehículo esté caliente y en condiciones óptimas de mantenimiento, su emisión de partículas no depende del tamaño del motor. En la Tabla 1.3 se muestran 2708 de 2715 vehículos de la primera medición, y 323 de 325 vehículos de la segunda medición, debido a que en algunas de las matrículas recibidas no puede verse claramente la cilindrada de estos vehículos, por lo tanto, la información se desconoce (tampoco se pudo evidenciar esta información en el SOAT o revisión técnico-mecánica: el valor para el campo de cilindrada aparece como 0 o 10).

CONSOLIDADO SEGUNDA MEDICIÓN

- Solicitaron segunda cita: 377 vehículos
- Asistieron: 325 vehículos (86 %)
- Aprobaron: 128 vehículos (39.4 %)

Los 325 vehículos que no aprobaron en la primera oportunidad emitieron en promedio 4.38 millones $\#/cm^3$. Los 128 (39.4 %) que aprobaron en segunda instancia, lo hicieron con un valor promedio de 1.02 ± 0.29 millones $\#/cm^3$.

Una muestra de 30 vehículos (23.4 % de los aprobados en segunda medición) reportaron el uso de **combustible B20** (20 % de biodiésel de palma mezclado al 80% de diésel fósil), con un promedio de 0.99 ± 0.27 millones $\#/cm^3$. De los que no aprobaron con el uso de B20, su valor medio de partículas no cambió significativamente y se mantuvo entre 4 y 5 millones $\#/cm^3$. En las Figuras 1.4 a 1.6 se muestra el efecto del B20 en el resultado de las pruebas de conteo de partículas medidos por segunda vez. La Figura 1.4 evidenció que el uso del B20 favoreció en mayor medida a los vehículos con año de modelo superior a 2008, pero no tuvo impacto significativo en vehículos medidos con modelos anteriores al año 2000. Lo anterior corresponde con el efecto en vehículos con menor kilometraje (< 200.000 km), como lo revela la Figura 1.5. El uso del B20 no mostró ninguna tendencia con la cilindrada de los vehículos como lo muestra la Figura 1.6.

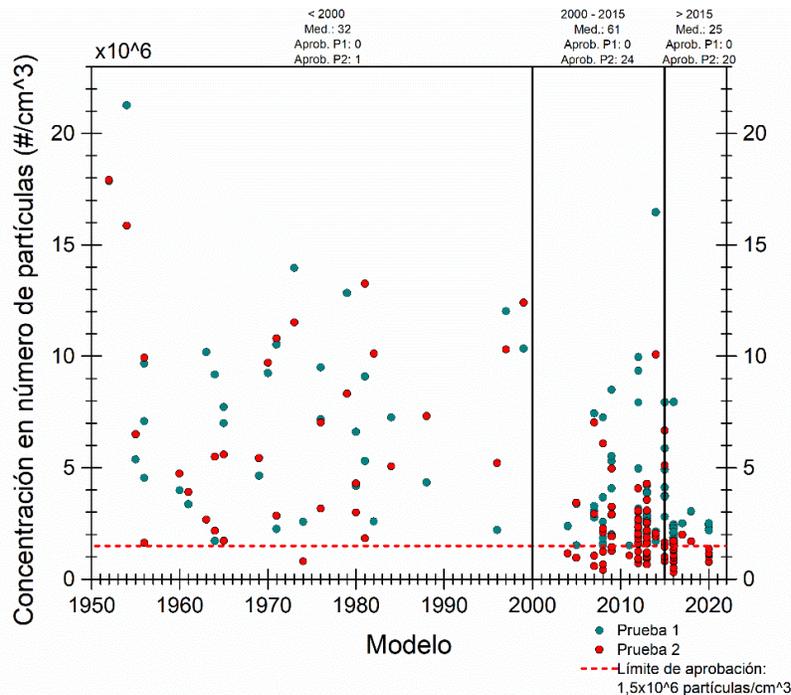


Figura 1.4. ($\#/cm^3$) por modelo del vehículo, con primera y segunda medición usando B20

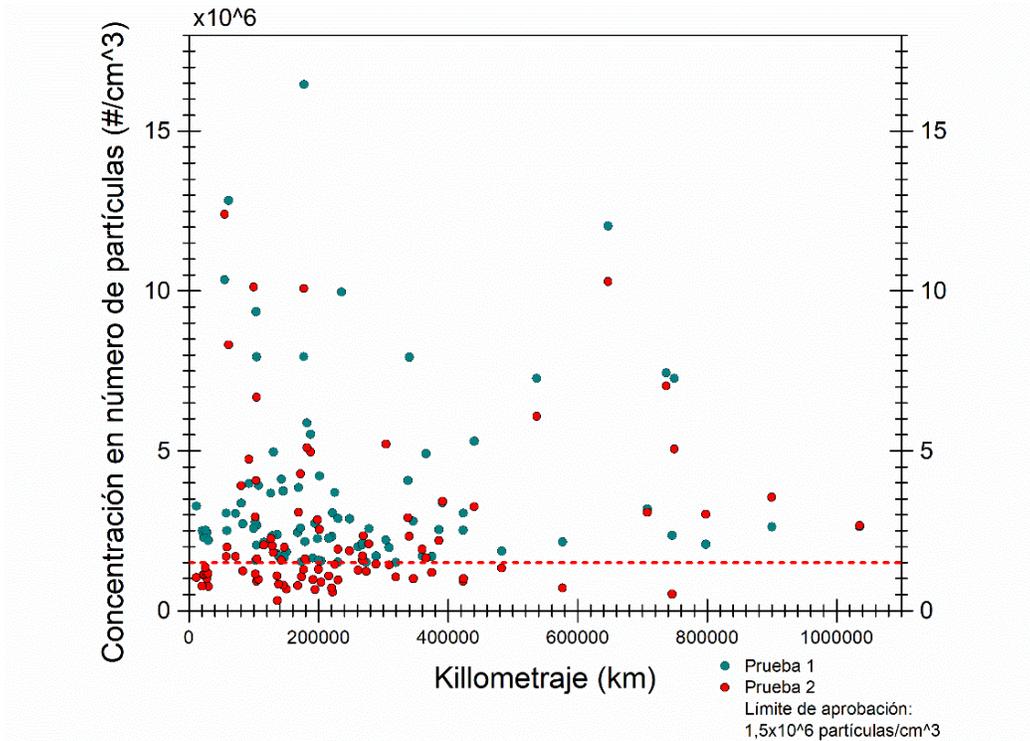


Figura 1.5. ($\#/cm^3$) por kilometraje, para vehículos con primera y segunda medición usando B20

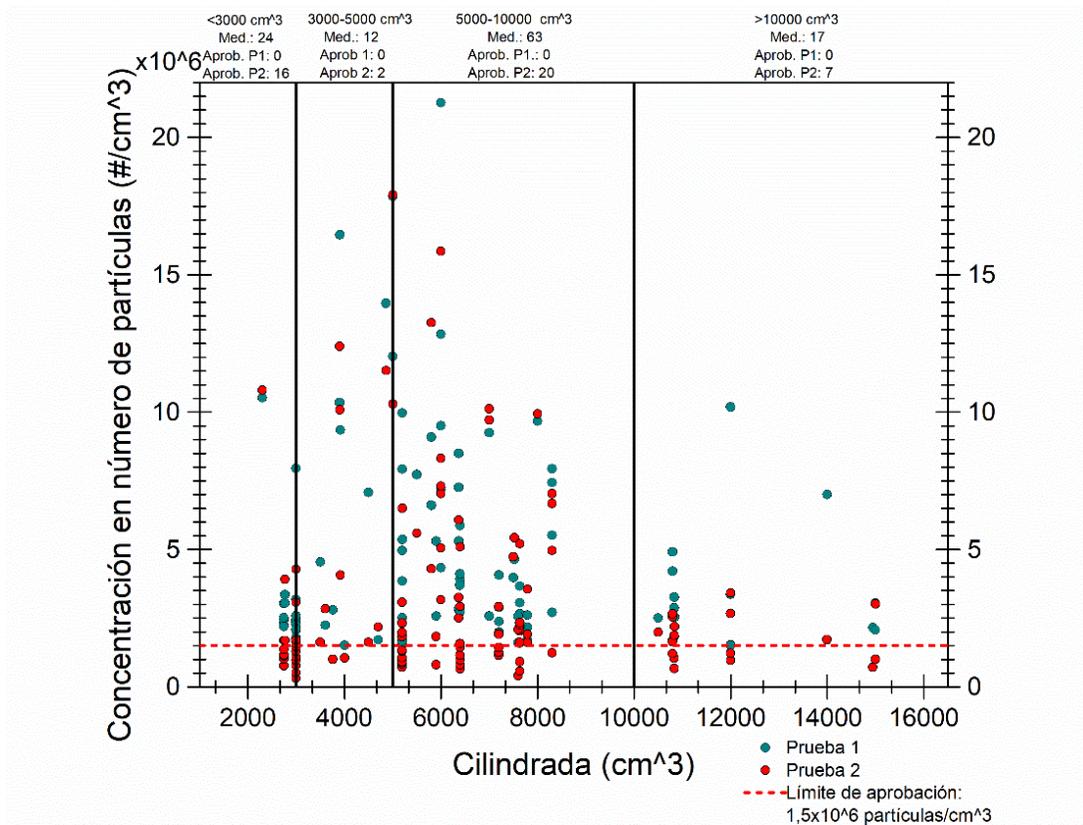


Figura 1.6. ($\#/cm^3$) por cilindrada, para vehículos con primera y segunda medición usando B20

MEJORAS REPORTADAS EN VEHICULOS QUE ASISTIERON A SEGUNDA MEDICIÓN

Con el ánimo de incentivar asistencia a la prueba de conteo de partículas en 2020, se determinó ofrecer una segunda oportunidad. Los vehículos aprobados en esta condición manifestaron haber realizado cambios como (Tabla 1.4):

- **Uso de biocombustible:** generalmente consiste en cambiar de combustible comercial (B10: 10% de biodiésel de palma + 90% diésel) por B20.
- **Filtros (aceite y combustible):** generalmente los cambios de filtro que más se reportaron fueron el de aceite motor y de combustible.
- **Calibración inyectores:** se refiere a ajuste de dosificación de combustible inyectado.
- **Calibración válvulas:** se refiere al ajuste apertura y cierre de estas válvulas para que estas no sobrepasen las aperturas máximas recomendadas.
- **Mantenimiento preventivo motor:** cambio de aceite motor, filtro aceite, filtro de aire, filtro combustible, limpieza radiador, ajuste nivel de refrigerante y limpieza general del motor.
- **Reparación de motor:** cambio de anillos, cilindros, bielas, empaquetaduras y demás consumibles que demanda el desarme de un motor diésel por requerimiento de reparación general del motor.
- **Limpieza sistema de inyección:** consiste en limpiar conductos, componentes (inyectores, bomba de inyección, etc) en sistema de inyección de vehículo diésel.
- **Limpieza postratamiento:** Consiste en eliminar incrustaciones que tenga el sistema de postratamiento de gases de escape del vehículo para que permita mejor fluidez de gases a la salida del escape.

Tabla 1.4. Cambios reportados por los 128 vehículos aprobados en segunda medición

Cambios reportados	Aprobaron	%
B20	30	23.4
Cambio de filtros	1	0.8
Calibraciones (inyectores / válvulas/afinación motor)	44	34.4
Mantenimiento preventivo	47	36.7
Reparación motor	1	0.8
Limpieza sistema inyección	4	3.1
Limpieza sistema de postratamiento	1	0.8

Finalmente, en la Tabla 1.5 se presentan los resultados por marca de vehículo. En la columna de aprobados se presenta el porcentaje respecto del total de vehículos de la misma marca, en la que la mayor representación del mercado la tiene Chevrolet con 965 de 2715 medidos (35.5%).

En el Anexo 1 se reportan los resultados detallados de los que aprobaron/no aprobaron discriminados por empresa participante.

Tabla 1.5. Resumen de resultados por marca de vehículo

Marca	PRIMERA MEDICIÓN			SEGUNDA MEDICIÓN		
	Aprobados	No Aprobados	Total	Aprobados	No Aprobados	Total
CHEVROLET	574 (60 %)	391	965	67	58	125
CITROEN	3	0	3			
DAF	6	6	12			
DAIHATSU	9	0	9			
DINA	0	2	2			
DODGE	38 (98 %)	1	39	11	1	12
DONG FENG	10	0	10	1	0	1
FIAT	3	0	3	1	0	1
FORD	51	11	62	14	0	14
FOTON	117 (63 %)	70	187	15	4	19
FREIGHTLINER	42 (34 %)	81	123	7	10	17
GMC	3	0	3	2	0	2
HINO	89 (55 %)	73	162	8	13	21
HYUNDAI	10	0	10			
INTERNATIONAL	194 (42 %)	271	465	23	16	39
IVECO	3	1	4	1	1	2
JAC	35	17	52	5	10	15
JBC	1	0	1			
JMC	4	2	6			
KAMAZ	1	0	1			
KENWORTH	115 (34 %)	222	337	14	4	18
KIA	4	0	4			
MACK	43 (83 %)	9	52	1	2	3
MAGIRUS DEUTZ	1	0	1	0	1	1
MAZDA	4	0	4	1	0	1
MERCEDES BENZ	85 (84 %)	16	101	3	2	5
MERCURY	4	0	4	1	0	1
MITSUBISHI	18 (100 %)	0	18	7	0	7
NISSAN	6	4	10			
PEGASSO	3	1	4			
PETERBILT	0	2	2			
RENAULT	10	3	13	4	0	4
SINOTRUK	0	1	1			
TAM	3	0	3			
TEREX	0	1	1			
VOLKSWAGEN	26 (63 %)	15	41	12	5	17
Total	1515	1200	2715	198	127	325

Finalmente, en su participación en el curso de capacitación que tuvo lugar en el marco del desarrollo de este convenio (ver Alcance No. 5), el ingeniero a cargo de mantenimiento de la flota de Coordinadora Mercantil, empresa que tuvo éxito en vehículos aprobados tanto en la primera como en la segunda medición, hizo tres recomendaciones de mantenimiento claves:

1. Garantizar el buen estado de todo el sistema de refrigeración
2. Determinar adecuada frecuencia de cambios de aceite y filtros (recomiendan análisis de aceite)
3. Calibración de los motores cuando sea necesario.

5. ALCANCE 2: VERIFICACIÓN DEL TIEMPO DE VALIDEZ DE LA PRUEBA DE CONTEO DE PARTÍCULAS

Los motores de combustión interna son máquinas térmicas que requieren de gran sincronismo y ajuste para mantener unas condiciones adecuadas de eficiencia energética y control en sus emisiones contaminantes. Sus características de funcionamiento tan variables, respecto a sus estados de carga y velocidad, hacen que se puedan presentar desgastes o desajustes muy fácilmente, exigiendo un estricto plan de mantenimiento coherente con sus demandas en la operación.

Evaluar la duración de la vigencia de la prueba de conteo de partículas, desde el punto de vista teórico, es bastante difícil, debido a la multitud de factores involucrados en la operación y mantenimiento de un motor de combustión. Por tal motivo, era conveniente realizar una evaluación experimental en la que se estudiara cuantos vehículos conservaban el distintivo ambiental después de un año y conocer la influencia del kilometraje recorrido, modelo (año) y tamaño del motor (cilindrada). Para realizar esta prueba experimental, se tomaron 560 vehículos que habían aprobado la prueba en 2019 y se evaluaron nuevamente en el 2020.

Para el análisis de la influencia de los factores: kilometraje recorrido, modelo (año) y tamaño del motor (cilindrada), se propusieron los niveles ilustrados en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Factores y niveles evaluados en el diseño experimental para ver el efecto en la vigencia de la prueba (cambio en el número de partículas medido).

Factor/Nivel	1	2	3	4
Kilómetros recorridos en un año [km] (GDK_#)	$0 \leq x < 10e3$	$10e3 \leq x < 30e3$	$30e3 \leq x < 50e3$	$50e3 \leq x < 200e3$
Cilindrada [cm ³] (GC_#)	$2000 \leq x < 3000$	$3000 \leq x < 4000$	$4000 \leq x < 5500$	$5500 \leq x < 8600$
Modelo [año] (GM_#)	$x < 1990$	$1990 \leq x < 2005$	$2005 \leq x < 2010$	$2010 \leq x < 2015$

Factor/Nivel	5	6	7	8
Kilómetros recorridos en un año [km] (GDK_#)				
Cilindrada [cm ³] (GC_#)	$8600 \leq x < 12900$	$12900 \leq x < 15000$		
Modelo [año] (GM_#)	$2015 \leq x < 2016$	$2016 \leq x < 2019$	$x == 2019$	$x == 2020$

Para una primera observación exploratoria, se presentan varios gráficos de las distribuciones del resultado de la medición, o del cambio de la misma entre 2019 y 2020, respecto a los factores propuestos, para luego verificar la influencia de los factores utilizando un análisis de varianza.

En la figura 2.1 se observan la distribución por grupos de modelos (GM) de vehículos que aprobaron nuevamente en 2020 (color azul) y los que no aprobaron (color naranja). En las ordenadas está el número de partículas medidas en millones por centímetro cubico.

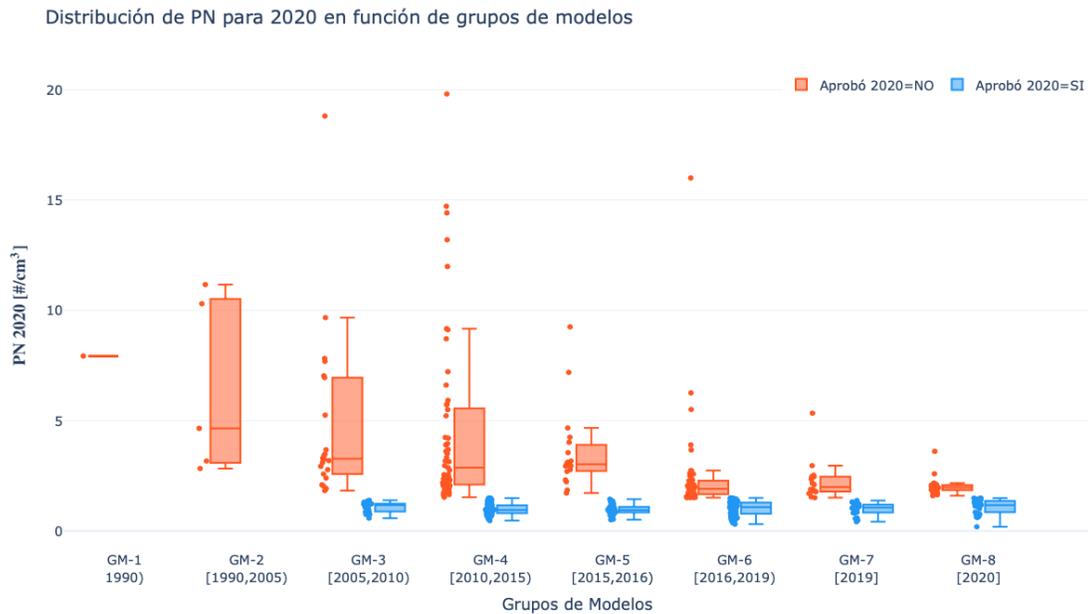


Figura 2.1. Distribución por grupos de modelos (GM) de vehículos que aprobaron nuevamente en 2020 (color azul) y los que reprobaron (color naranja).

Para evaluar la validez temporal de la prueba, se tomó como variable dependiente el cambio en el número de partículas medido entre el 2019 y 2020, es decir, la diferencia del número de partículas medidas en millones por centímetro cubico, entre la prueba del 2020 y la de 2019.

En la figura 2.2 se observan la distribución por grupos de kilometraje recorrido (GDK) en el año de vehículos que aprobaron nuevamente en 2020 (color azul) y los que no aprobaron (color naranja). En las ordenadas está la diferencia del número de partículas medidas en millones por centímetro cubico entre la prueba del 2020 y la de 2019.

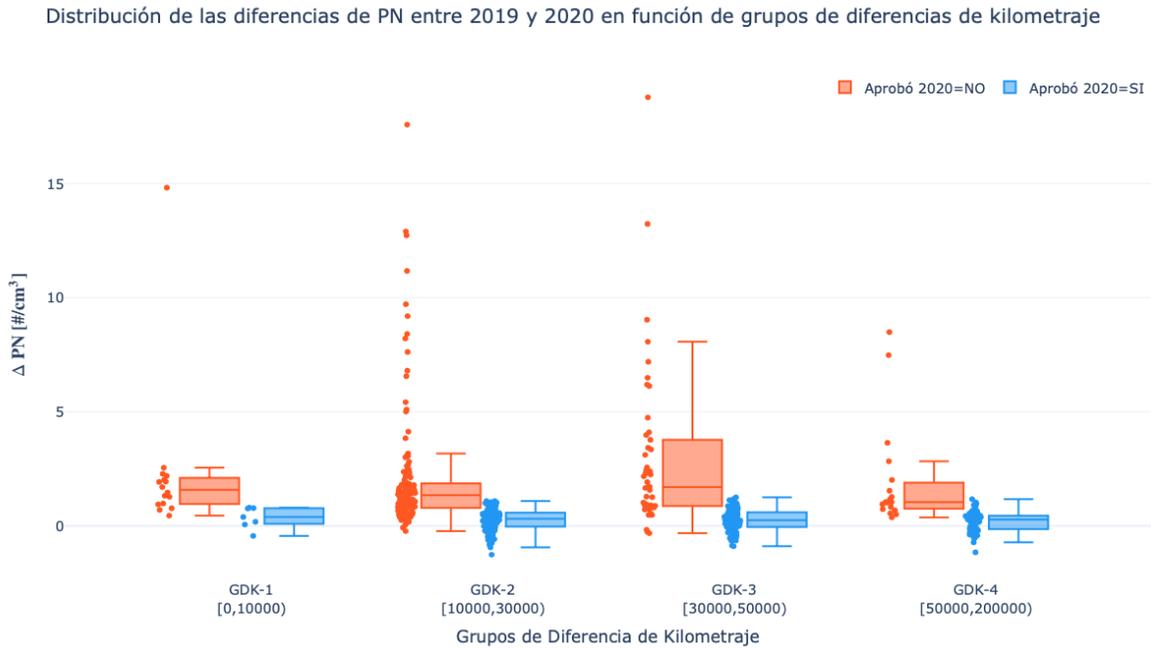


Figura 2.2. Diferencia del número de partículas, medidas en millones por centímetro cubico, entre la prueba del 2020 y la prueba del 2019 respecto a los Grupos de Kilometraje recorrido en un año (GDK).

En la figura 2.3 se observan la distribución por grupos de cilindrada (GC) de vehículos que aprobaron nuevamente en 2020 (color azul) y los que no aprobaron (color naranja). En las ordenadas está la diferencia del número de partículas, medidas en millones por centímetro cubico, entre la prueba del 2020 y la de 2019.

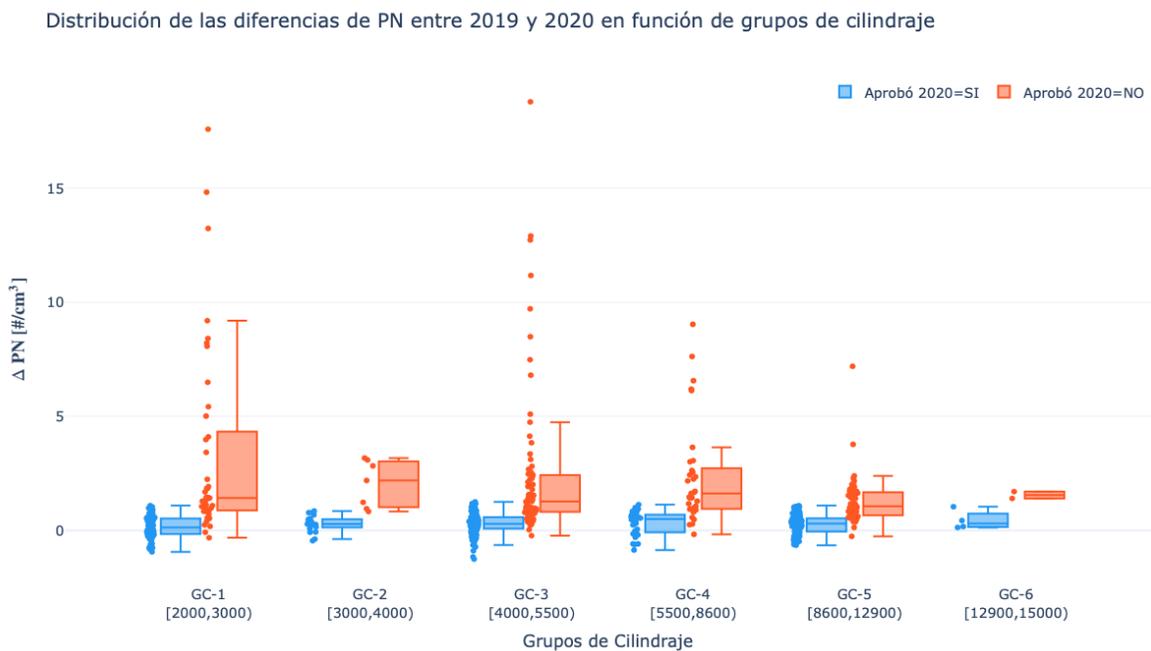


Figura 2.3. Diferencia del número de partículas, medidas en millones de partículas por centímetro cubico, entre la prueba del 2020 y la prueba del 2019 respecto a los Grupos de Cilindrada (GC).

En la figura 2.4 se observan la distribución por grupos de modelo (GM) de vehículos que aprobaron nuevamente en 2020 (color azul) y los que reprobaron (color naranja). En las ordenadas está la diferencia del número de partículas, medidas en millones de partículas por centímetro cubico, entre la prueba del 2020 y la de 2019.

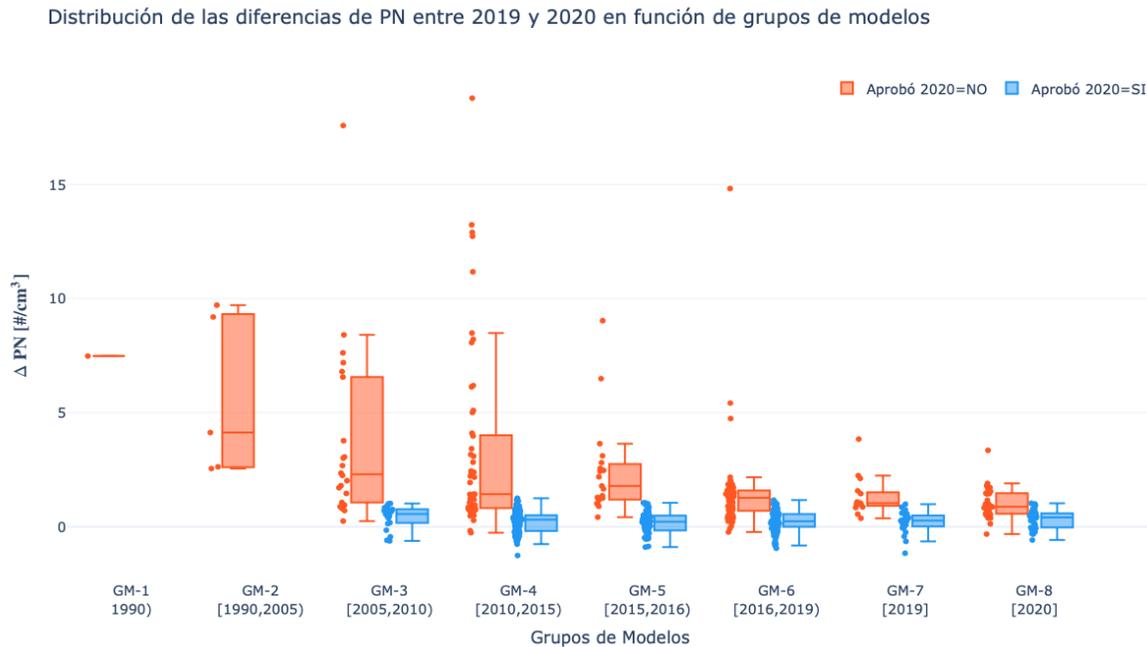


Figura 2.4. Diferencia del número de partículas, medidas en millones de partículas por centímetro cubico, entre la prueba del 2020 y la prueba del 2019 respecto a los Grupos de Modelo.

En las figuras exploratorias anteriores (2.1 a 2.4) se observan algunas tendencias según los niveles de los factores, pero es difícil evaluar el efecto de cada factor sobre el cambio en la medición del número de partículas. Para evaluar el efecto es recomendable utilizar análisis de varianza, teniendo presente que solo tiene un alcance exploratorio y no predictivo, debido al limitante de la comprobación de los supuestos estadísticos de la distribución de los datos respecto a la homoscedasticidad, autocorrelación y normalidad.

En la tabla 2.2 se observa el análisis de varianza (ANOVA) para la variable dependiente de diferencia en el valor de la prueba entre el 2020 y el 2019. Los factores utilizados fueron los grupos de: Modelo (GM), Cilindrada (GC) y kilometraje recorrido (GDK). Lo cual indica que el modelo y la cilindrada tuvieron efecto estadísticamente significativo sobre la variable diferencia de valor de la prueba entre 2020 y 2019. El factor de kilometraje recorrido no tuvo efecto estadísticamente significativo.

Tabla 2.2. Análisis de varianza para el cambio de número de partículas

FACTOR	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
GM	302,15	7	43,1643	11,18	0,0000
GC	126,632	5	25,3265	6,56	0,0000
GDK	14,849	3	4,94966	1,28	0,2798
RESIDUO	2100,7	544	3,86158		
TOTAL	2508,45	559			

En la figura 2.5 se presentan las figuras de medias en los que claramente se observan tendencias en los factores de modelo del vehículo y cilindrada del motor sobre el cambio en el número de partículas medidas. En particular, el cambio en el número de partículas disminuye para modelos más recientes.

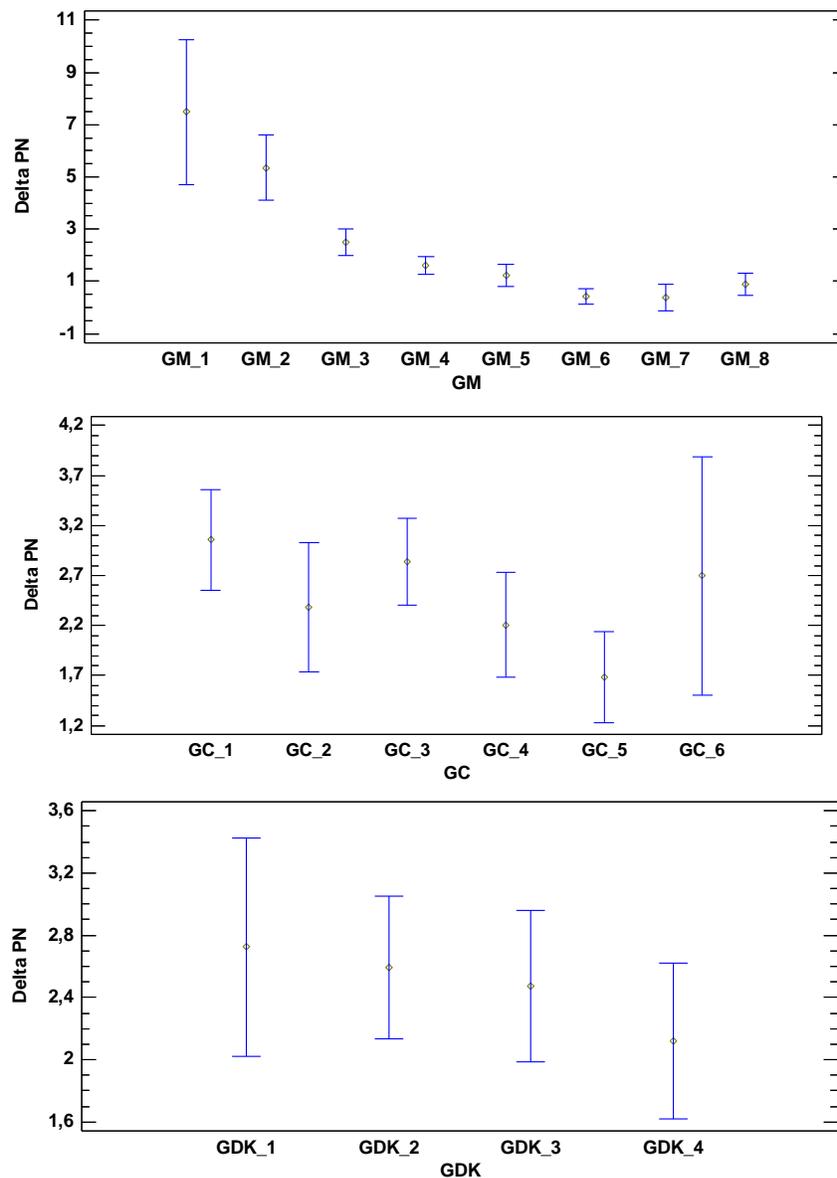


Figura 2.5. Medias de cambio del numero de partículas respecto a los factores: Modelo (GM), Cilindrada (GC) y kilometraje recorrido (GDK).

De los 560 vehículos que aprobaron en 2019, volvieron a aprobar 345 vehículos en 2020, es decir el 61.6 %. Mientras que el 38.4% no aprobaron después de transcurrir un año de la prueba anterior.

CONCLUSIONES

Analizando los vehículos que aprobaron en 2019 y que realizaron la prueba en el 2020, se observa que alrededor del 61.6% de los vehículos volvieron a aprobar, lo que muestra que, en 1 año, el 38.4% de los vehículos ya no aprobarían, por lo que se sugiere realizar la prueba para distintivos ambientales con periodicidad semestral.

El análisis de varianza mostró que el kilometraje recorrido en el año no tuvo efecto estadísticamente significativo sobre el cambio en la medición del número de partículas, lo que podría reflejar que más que el kilometraje recorrido, la concentración del número de partículas emitidas en condiciones de ralentí caliente, depende del mantenimiento y adecuada calibración del motor.

En el análisis de varianza también se observa que el cilindraje y el año del modelo del vehículo tuvieron efecto estadísticamente significativo sobre el cambio en la medición del número de partículas, mostrando una tendencia favorable en la disminución del número de partículas emitidas de un piloto al siguiente (delta de número de partículas) para los vehículos de modelo reciente.

6. ALCANCE 3: VALIDEZ DE LOS UMBRALES DE NÚMERO DE PARTÍCULAS

El primer piloto de distintivos ambientales por concentración en número de partículas realizado entre el 8 de agosto y el 30 de septiembre de 2019 en el marco del convenio interadministrativo No. 888 de 2017 entre el Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA) y la Universidad de Antioquia, consistió en la medición de 1547 vehículos diesel. De éstos, 772 (49.9 %) fueron aprobados, al tener un valor menor al umbral establecido de 2'000.000 #/cm³. El número de vehículos rechazados fue de 775 (50.1 %). El rango de la concentración del número de partículas de los vehículos que aprobaron varió entre 36.000 #/cm³ y 1'990.000 #/cm³, mientras que para los vehículos rechazados varió entre 2'009.999 #/cm³ y 34'760.000 #/cm³.

Inicialmente se usó como único criterio de aprobación la concentración en #/cm³. Sin embargo, a partir del día 3 de septiembre se comenzó a usar, además, la concentración en masa (mg/m³) debido a un vehículo que aprobó el umbral de número, pero emitía humo negro ligeramente visible. Por estemotivo, los vehículos medidos antes del 3 de septiembre no contaron con el valor de concentración en masa en la base de datos original. Debido a esto, se procesó de nuevo toda la base de datos de los 1547 vehículos, calculando los valores de concentración en número y en masa, a partir de los archivos de datos brutos de cada equipo de medida (Dekati, propiedad de Ecopetrol, y Pegasor, propiedad de la Universidad de Antioquia).

En este informe se presentan los resultados del análisis de la base de datos, incluyendo los datos de concentración en masa. En primer lugar, se realizó un análisis de agrupamiento de los datos, encontrando dos grupos diferenciados identificados como SI y NO en función de que aprobara (SI) o no aprobara (NO) los criterios de concentración de número de partículas menor o igual a 2'000.000 #/cm³ y concentración de masa de partículas menor o igual a 5 mg/m³. Posteriormente se exploró mediante árboles de decisión la clasificación de los datos agrupados, según algunas variables de los vehículos (cilindrada, año de modelo, concentración másica de partículas, kilometraje, y tipo de vehículo). Este análisis se realizó para los siguientes valores de umbral de concentración en número de partículas (en millones / cm³): 1.4, 1.5, 1.6, 1.7, 1.8, y 1.9.

En la Figura 3.1 se muestra uno de los árboles de decisión obtenidos para el umbral de 1'400.000 #/cm³. En éste se identifica que vehículos con concentración másica menor a 0.305 mg/m³ tienen probabilidad de 0.9679 de pertenecer al grupo denominado "SI" (alta probabilidad de aprobar la prueba). Además, se ve que el 13.8% de todos los vehículos medidos cumplen esta condición de concentración másica.

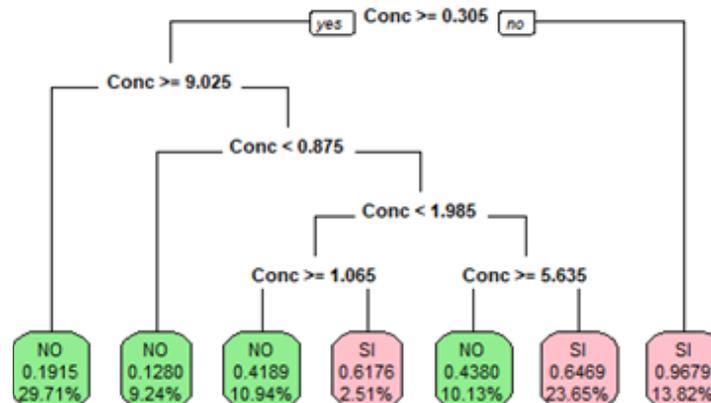


Figura 3.1. Árbol de decisión: umbral 1'400.000 #/cm³, concentración.

El árbol de decisión de la figura anterior también muestra que el 23.6% del total de vehículos con una concentración entre 1.98 mg/m³ y 5.64 mg/m³, tienen probabilidad de 0.6469 de pertenecer al grupo denominado "SI", es decir, dentro de los que aprobarían la prueba con este nuevo umbral.

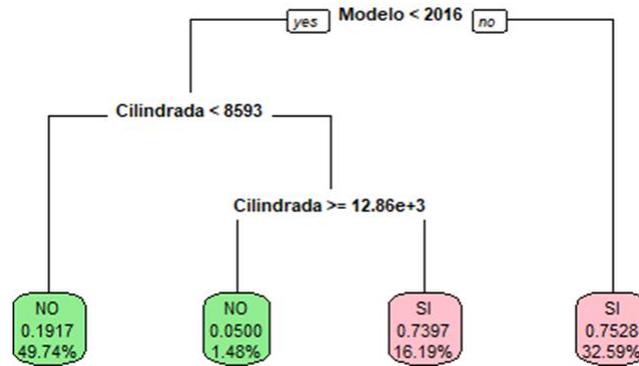


Figura 3.2. Árbol de decisión: umbral 1'400.000 #/cm³, modelo y cilindrada.

La Figura 3.2 muestra otro árbol de decisión para el umbral de 1'400.000 #/cm³. El año 2016 representa una división relevante para categorizar los vehículos medidos según su modelo. En este caso los vehículos con año de modelo igual o mayor a 2016 (32.59% del total), tienen alta probabilidad (0.7528) de pertenecer al grupo "SI" (aprobados).

El efecto del tipo de vehículo (Volqueta/No Volqueta) fue significativo únicamente en para el umbral de 1'900.000 #/cm³, para vehículos de modelo anterior a 2016. En este caso las volquetas con año de modelo entre 2007 y 2016 tienen una probabilidad de aprobar de 0.7216 (18.85% del total de vehículos medidos), según se muestra en la Figura 3.3.

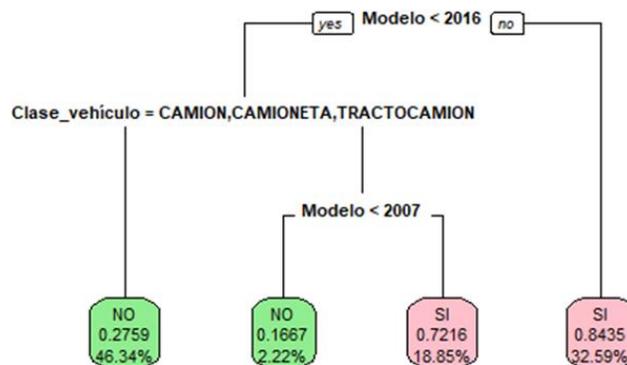


Figura 3.3. Árbol de decisión: umbral 1'900.000 #/cm³, modelo y tipo de vehículo.

Por otro lado (ver figura 3.4), las volquetas con año de modelo anterior a 2016, y con concentración másica menor que 5.41 mg/m³, tienen alta probabilidad de ser aprobados de 0.9633 (8.06 % de los vehículos medidos). Si la concentración es mayor o igual a dicho valor, la probabilidad de aprobación se reduce a 0.6226 (7.83% de los vehículos).

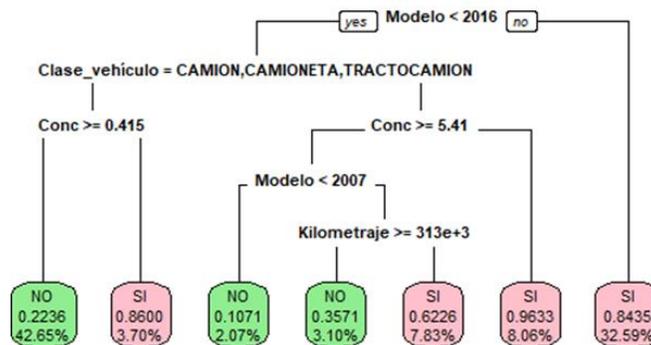


Figura 3.4. Árbol de decisión: umbral 1'900.000 #/cm³, modelo, concentración, kilometraje.

Se analizaron árboles de decisión similares para las otras variables analizadas, así como para todos los umbrales analizados. En la Tabla 3.1. se presenta un resumen de los resultados de este estudio.

Tabla 3.1. Resumen árboles de decisión de umbrales de concentración de número de partículas

Umbral PN = 1.4×10^6		
Criterios	% Aprobación¹	Prob. Aprob. (%vehículos²)
PM <0.305 mg/m ³	24	0.97 (13.8)
1.985 mg/m ³ <= PM <= 5.63 mg/m ³	27.7	0.65 (23.7)
DX <121.700 km	41.32	
Mod >= 2016	44.2	0.75 (32.6)
Mod <2016 & 8.6 lt <= Cil <= 12.9 lt	21.4	0.74 (16.2)
Umbral PN = 1.5×10^6		
PM <0.335 mg/m ³	25.9	0.98 (14.9)
1.985 mg/m ³ <= PM <= 5.66 mg/m ³	29	0.67 (23.8)
DX <121.700 km	44	0.67 (36.2)
Mod >= 2016	46.1	0.79 (32.6)
Mod <2016 & 8.6 lt <= Cil <= 12.9 lt	22.1	0.76 (16.2)
Umbral PN = 1.6×10^6		
PM <0.345 mg/m ³	27.1	0.98 (15.5)
2.74 mg/m ³ <= PM <= 9.1 mg/m ³	31.4	0.66 (26.3)
DX <121.700 km	45	0.69 (36.2)
Mod >= 2016	47.1	0.80 (32.6)
Mod <2016 & 8.6 lt <= Cil <= 12.9 lt	22.8	0.79 (16.2)
Umbral PN = 1.7×10^6		
PM <0.365 mg/m ³	27.9	0.97 (16)
1.47 mg/m ³ <= PM <= 9.1 mg/m ³	46	0.62 (40).8
DX <121.700 km	46	0.70 (36.2)
Mod >= 2016	48.1	0.82 (32.6)
Mod <2016 & 8.6 lt <= Cil <= 12.9 lt	22.8	0.79 (16.2)
Umbral PN = 1.8×10^6		
PM <0.395 mg/m ³	29.2	0.96 (16.9)
1.47 mg/m ³ <= PM <= 9.1 mg/m ³	47	0.63 (40).8
DX <121.700 km	47.3	0.72 (36.2)
Mod >= 2016	49.4	0.84 (32.6)
Mod <2016 & 8.6 lt <= Cil <= 12.9 lt	22.9	0.79 (16.2)
Umbral PN = 1.9×10^6		
PM <0.415 mg/m ³	30.1	0.97 (17.3)
1.47 mg/m ³ <= PM <= 9.1 mg/m ³	47.6	0.64 (40).8
DX <121.700 km	47.7	0.73 (36.2)
Mod >= 2016	49.6	0.84 (32.6)
Mod <2016 & 8.6 lt <= Cil <= 12.9 lt	23.2	0.79 (16.2)

¹Respecto a los vehículos aprobados

²Respecto a todos los vehículos medidos

Esta tabla, obtenida mediante la técnica estadística de árboles de decisión, muestra valores de algunas variables de clasificación que se repiten para los diferentes umbrales estudiados, destacando para el kilometraje: 121.700 km, para el año: 2016, y la combinación de vehículos anteriores a 2016, cuya cilindrada esté entre 8.6L y 12.9L. Por este motivo, se introdujeron estos valores en la representación de los resultados de la fase 1 que se mostrarán a continuación.

A continuación, se presentan resultados descriptivos de las mediciones realizadas durante el primer piloto del distintivo ambiental en 2019. En la Figura 3.5 se muestra el conteo de vehículos por año de modelo. La tasa de rechazo fue significativamente mayor que la de aprobación hasta el año 2014. A partir de 2015 cambia esta tendencia, pero es a partir del año 2016 (identificado mediante los árboles de decisión), desde cuando se tiene una tasa de aprobación significativamente mayor que la de rechazo.

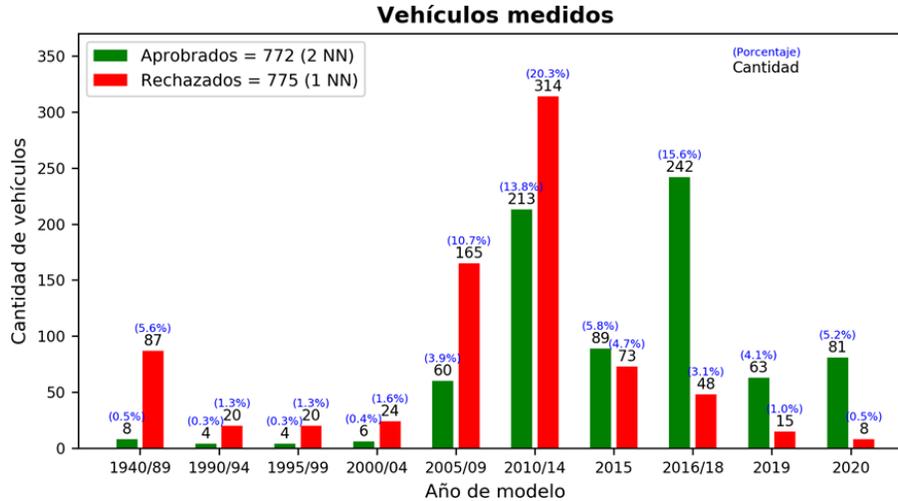


Figura 3.5. Resultados por año de modelo para todos los vehículos medidos en el primer piloto de 2019

Se concluye que los vehículos con año de modelo 2016 o mayor tienen alta probabilidad de pasar la prueba. El resultado de la figura anterior muestra que un año de modelo más adecuado para una medida de este tipo sería 2016. Es posible que para este año hayan entrado en circulación más vehículos que cumplen la norma Euro 4/IV, ya que muchos de los vendidos durante el año 2015 se habían importado con anterioridad a la entrada en vigencia de la Resolución 1111 de 2013, del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

En la Figura 3.6 se aprecia que 481 vehículos emitieron por debajo de $1'000.000 \text{ \#/cm}^3$ (alrededor del 60 % de los aprobados), y 684 vehículos con emisiones inferiores a $1'500.000 \text{ \#/cm}^3$ (alrededor del 89 % de los aprobados). Es interesante observar que en todos los rangos de año de modelo el 75% de los vehículos tienen emisiones por debajo del umbral de $1'500.000 \text{ \#/cm}^3$ (Figura 3.7). Esto es importante, ya que, al bajar el umbral usado en el piloto de 2019, no se penalizó a los vehículos más antiguos, mientras tengan buen estado de mantenimiento y emisiones bajas.

El año de modelo tiene un efecto más significativo en los vehículos rechazados. Como se muestra en la Figura 3.8, los vehículos con modelo 2016 o posterior emiten significativamente menos partículas que aquellos más antiguos, además de presentar menos dispersión en los resultados.

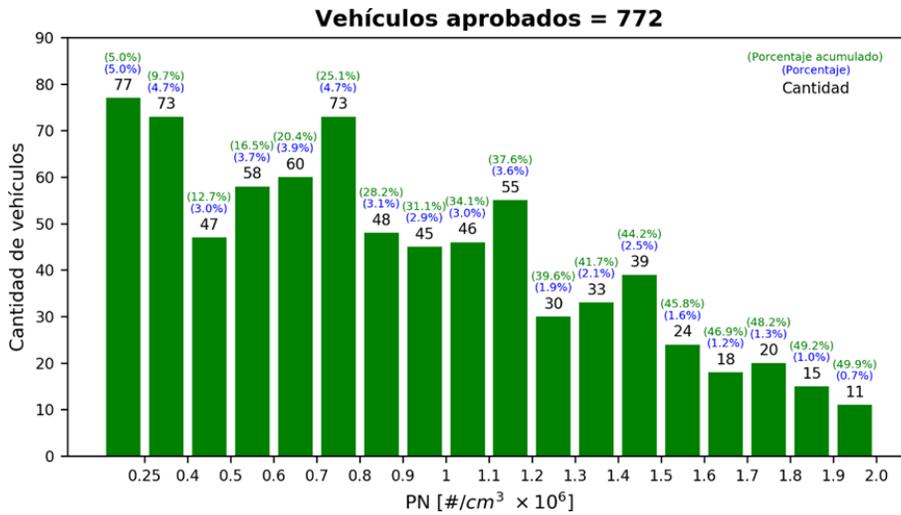


Figura 3.6. Cantidad de vehículos vs. umbral de $\#/cm^3$ – Vehículos aprobados

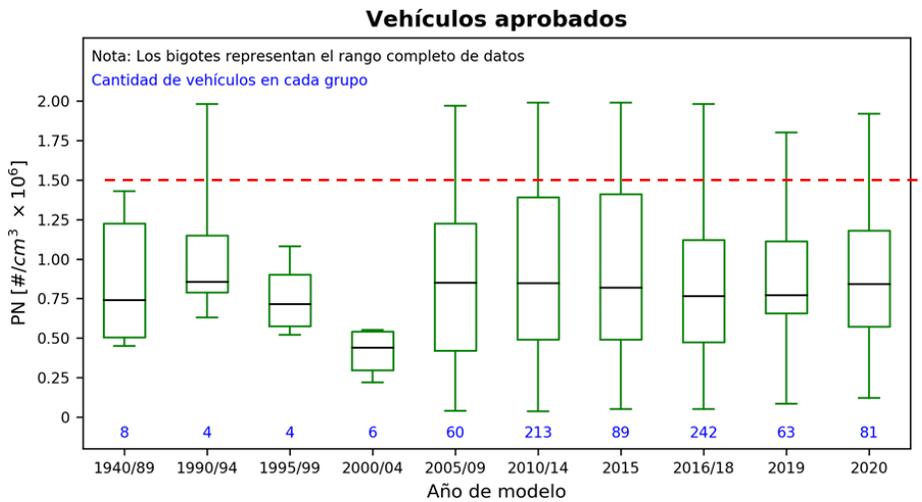


Figura 3.7. Emisión de partículas ($\#/cm^3$) por año de modelo – Vehículos aprobados

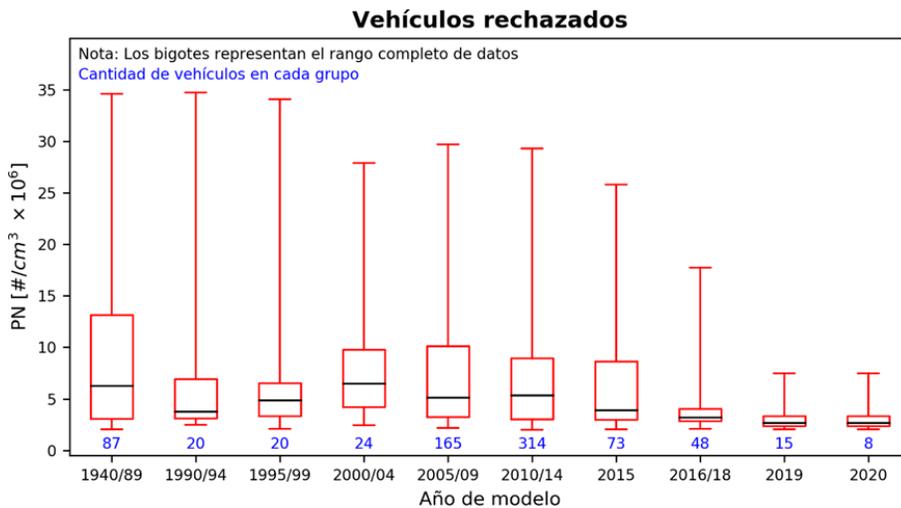


Figura 3.8. Emisión de partículas ($\#/cm^3$) por año de modelo – Vehículos rechazados

En la Figura 3.9 se observa que para los vehículos aprobados hay una tendencia leve a disminuir la mediana de las emisiones de número de partículas, a medida que la cilindrada aumenta. De nuevo, en todos los rangos de cilindrada el 75 % de los vehículos tienen emisiones por debajo del umbral de **1'500.000 #/cm³**. Esto es importante, ya que no se penalizará a los vehículos por su cilindrada mientras tengan buen estado de mantenimiento y emisiones bajas.

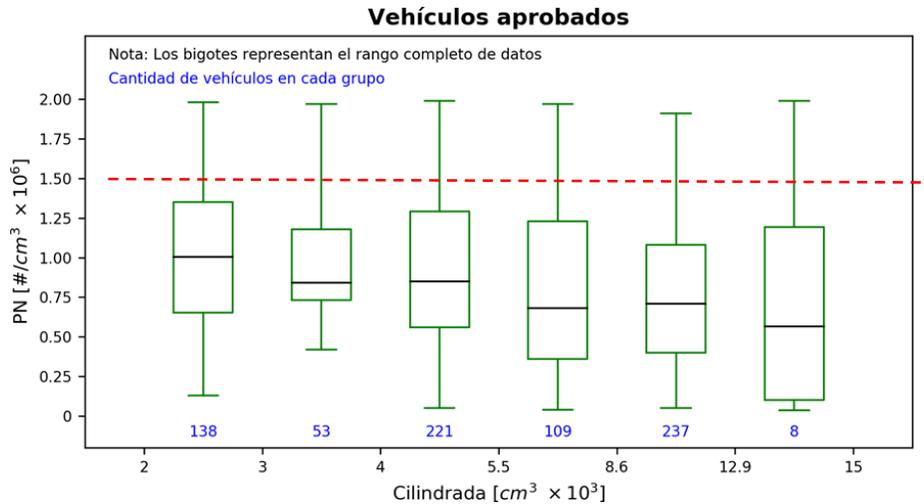


Figura 3.9. Emisión de partículas (#/cm³) por cilindrada – Vehículos aprobados en 2019

En el caso de los vehículos rechazados, la cilindrada tiene un efecto significativo en las emisiones de partículas (Figura 3.10). Se observa cómo los vehículos con cilindrada entre 8.6L y 12.9L (según reveló el análisis por medio de árboles de decisión) tienen las emisiones más bajas.

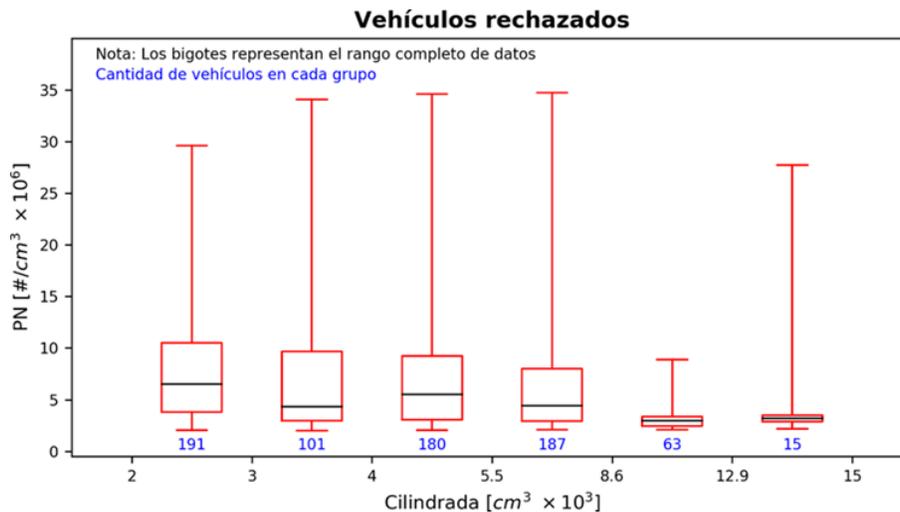


Figura 3.10. Emisión de partículas (#/cm³) por cilindrada – Vehículos rechazados en 2019

En la Figura 3.11 se presenta el efecto del kilometraje del vehículo en las emisiones de PN. Es claro que esta variable no tiene un efecto significativo sobre las emisiones de número de partículas.

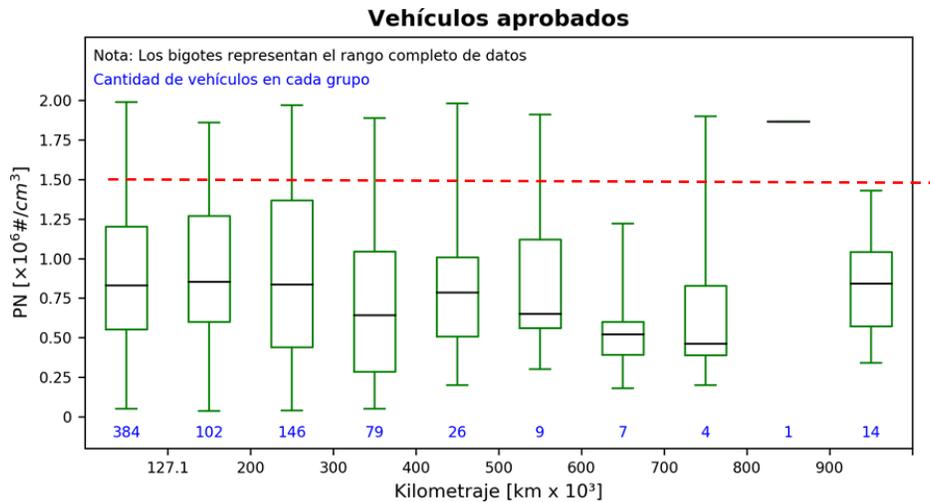


Figura 3.11. Emisión de partículas (#/cm³) por kilometraje – Vehículos aprobados en 2019

A continuación, se presentan resultados relativos a la emisión de partículas en masa por unidad de volumen. La Figura 3.12 muestra que 545 de los 772 vehículos aprobados en el primer piloto de conteo de partículas realizado en 2019 emitieron menos de 5 mg/m³. Aproximadamente el 30% de los vehículos superó este umbral de emisiones en masa (227 vehículos). 119 tuvieron emisiones entre 5 y 10 mg/m³, y 98 entre 10 y 50 mg/m³. Finalmente, hubo 9 vehículos con emisiones entre 50 y 160 mg/m³. En todos los casos, aunque se superara el umbral de 5 mg/m³, se verificó que los vehículos no emitían humo negro.

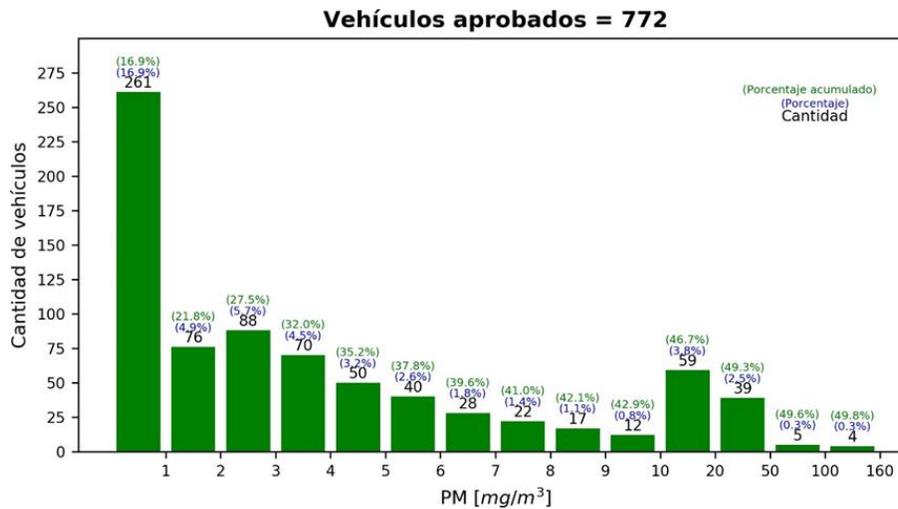


Figura 3.12. Cantidad de vehículos aprobados por concentración másica de partículas (mg/m³)

La Figura 3.13 muestra que los vehículos con las mayores emisiones de masa de partículas tienen año de modelo entre 2005 y 2019. La Figura 3.14 presenta una ampliación de la anterior, en la cual se puede ver que, a pesar de la alta dispersión, la mayoría de los vehículos con año de modelo 2016 o superior tienen las emisiones de masa de partículas más bajas.

En el caso de los vehículos rechazados, las emisiones de masa pueden sobrepasar los 1.800 mg/m³ (Figura 3.15).

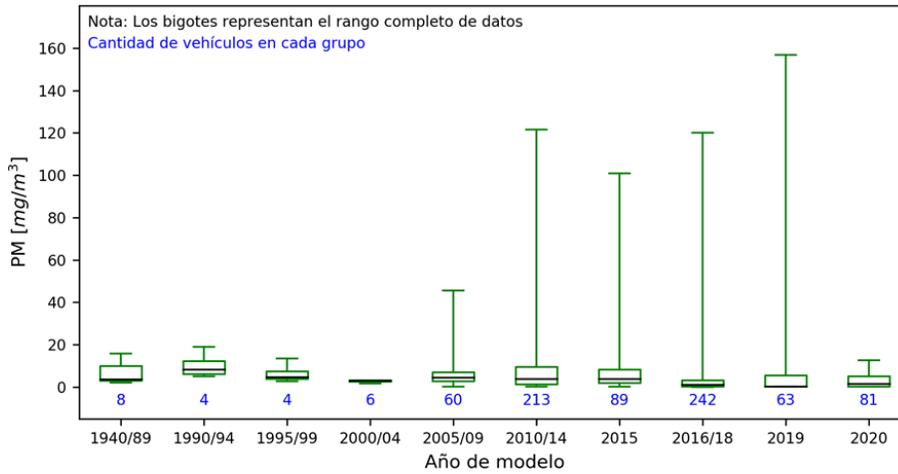


Figura 3.13. Emisión máscica de partículas por año de modelo – Vehículos aprobados

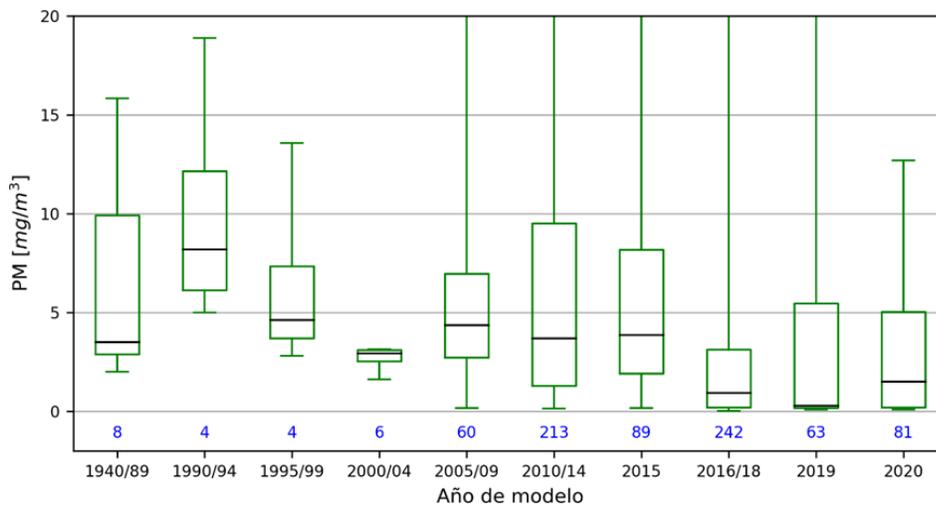


Figura 3.14. Emisión máscica de partículas por año de modelo – Vehículos aprobados (ampliación)

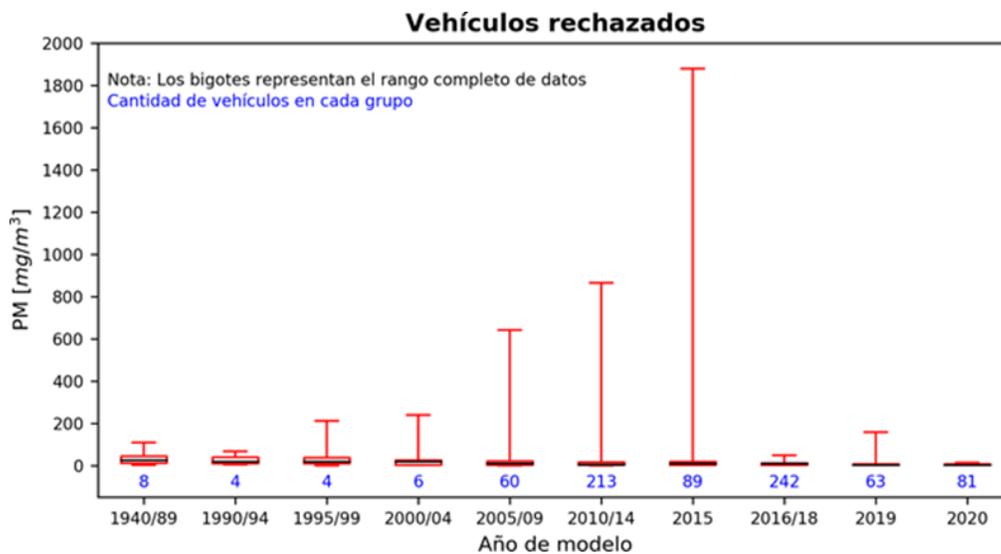


Figura 3.15. Emisión de masa de partículas por año de modelo – Vehículos rechazados

Los datos la Figura 3.15 se ven mejor en la ampliación presentada en la Figura 3.16, en la cual se observa nuevamente que las menores emisiones de masa se dan en los vehículos con año de modelo 2016 o superior.

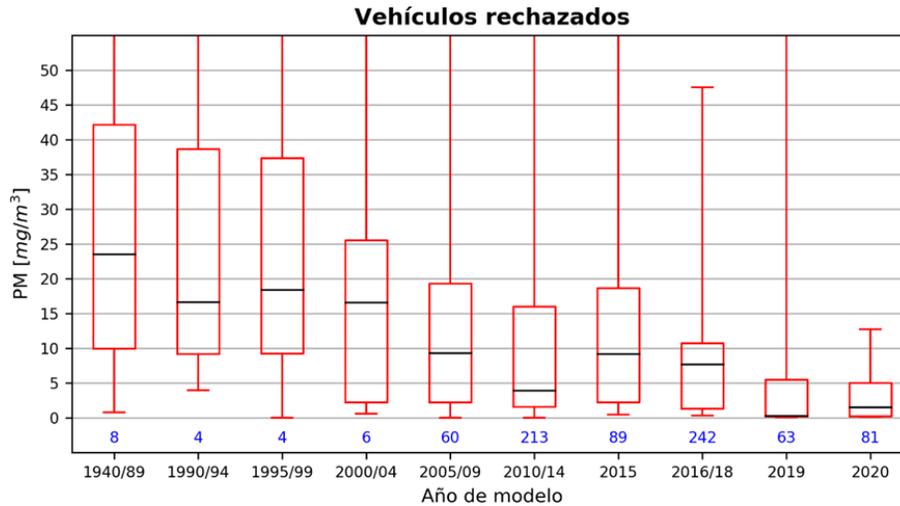


Figura 3.16. Emisión de masa de partículas por año de modelo – Vehículos rechazados (ampliación)

Las Figuras 3.17 y 3.18 permiten observar que la cilindrada tiene un efecto significativo sobre las emisiones de concentración másica de partículas.

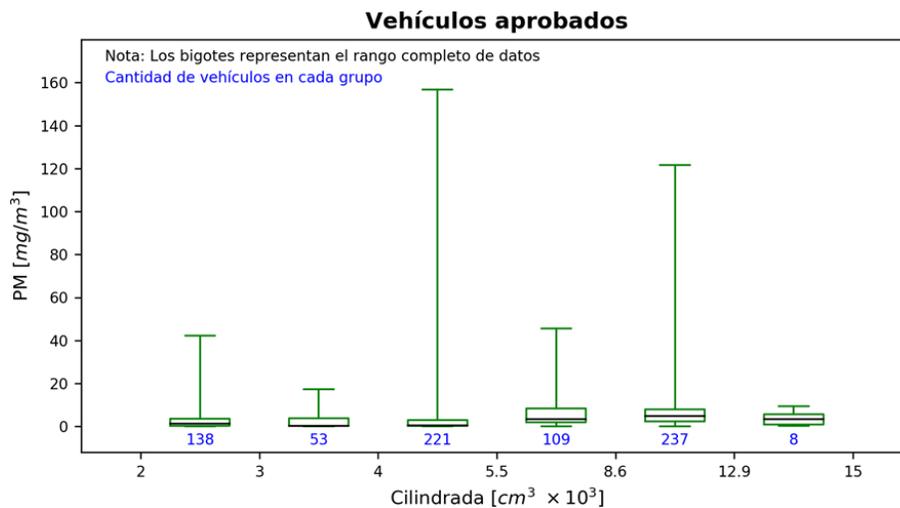


Figura 3.17. Emisión de masa de partículas por cilindrada – Vehículos aprobados

En general, la mayoría vehículos de menos de 5.5L tienen menores emisiones de masa. En este grupo hay excepciones importantes, ya que los mayores contaminantes del piloto de 2019 están en este rango de cilindrada.

Con lo sugerido por los árboles de decisión, se presenta el efecto del kilometraje en la emisión másica de partículas en las Figuras 3.19 y 3.20.

La mayoría de los vehículos con recorrido menor a 127.100 km tiene emisiones más bajas que el resto, a pesar de que en este grupo están los vehículos más contaminantes de la prueba. En general, no se puede concluir que el kilometraje tenga un efecto marcado sobre las emisiones de masa de partículas, lo cual sugiere que lo más importante son la calibración de la electrónica y el estado de mantenimiento.

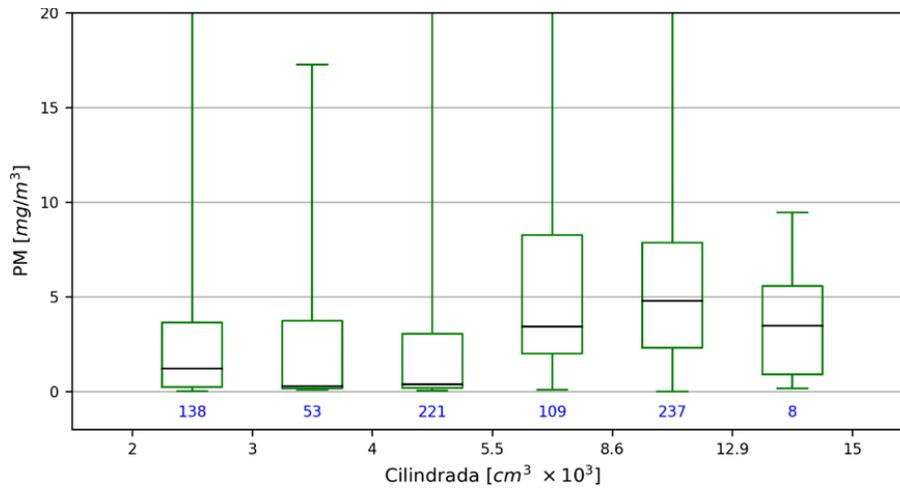


Figura 3.18. Emisión de masa de partículas por cilindrada – Vehículos aprobados (ampliación)

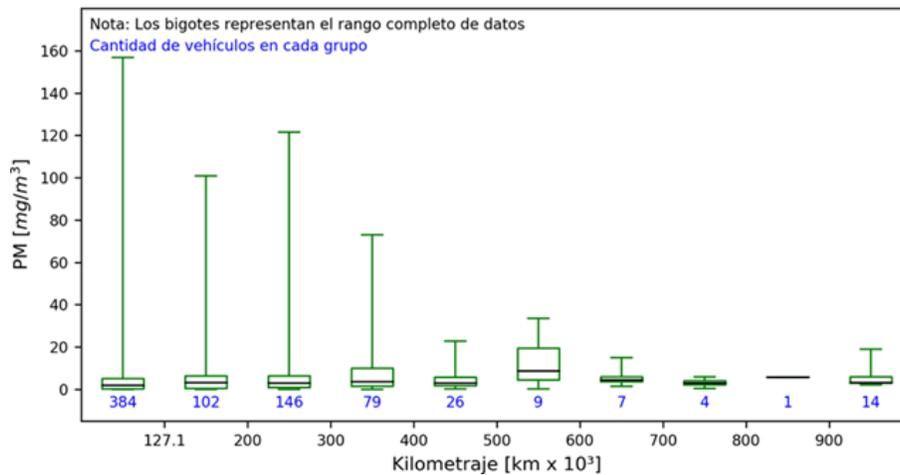


Figura 3.19. Emisión de masa de partículas por kilometraje – Vehículos aprobados

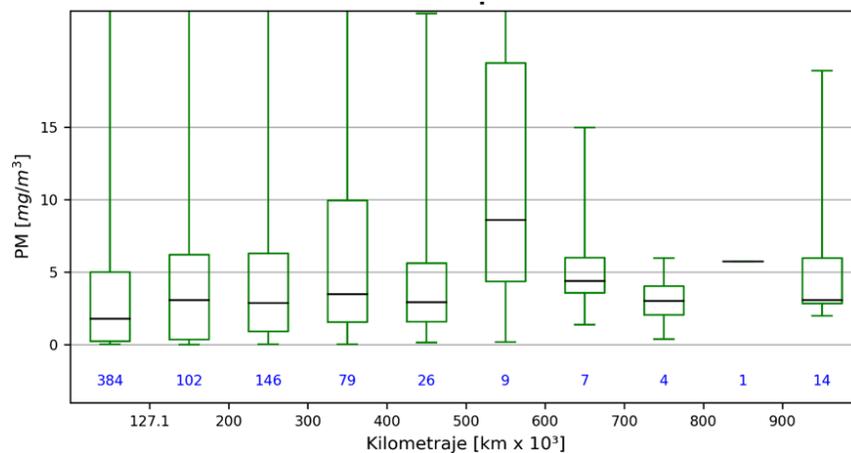


Figura 3.20. Emisión de masa de partículas por kilometraje – Vehículos aprobados (ampliación)

La correlación entre emisión másica y número de partículas de los vehículos aprobados se presenta en la Figura 3.21. Se nota que hay mucha dispersión, pero que los cuartiles del 75 % corresponden a una emisión baja de emisión másica de partículas.

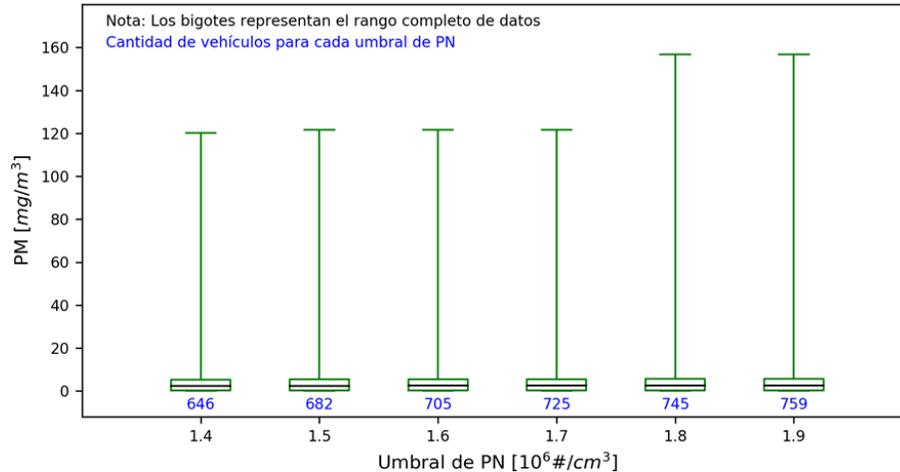


Figura 3.21. Emisión de masa de partículas vs número de partículas – vehículos aprobados

Para observar mejor estos valores, se hace una ampliación en la Figura 3.22. En esta figura se aprecia que, para todos los umbrales propuestos, el cuartil correspondiente al 75 % siempre está entre 5 y 6 mg/m³, y la mediana entre 2 y 3 mg/m³. Las dos figuras anteriores evidencian que no se puede garantizar que todos los vehículos tengan emisiones de concentración másica menores a 5 mg/m³, aun bajando el umbral hasta 1'400.000 #/cm³, debido a que hay valores elevados en todos los umbrales propuestos. Sin embargo, la mayoría de los datos está por debajo de 6 mg/m³ y **la mediana de los datos está entre 2 y 3 mg/m³ para todos los umbrales por debajo de 2'000.000 #/cm³.**

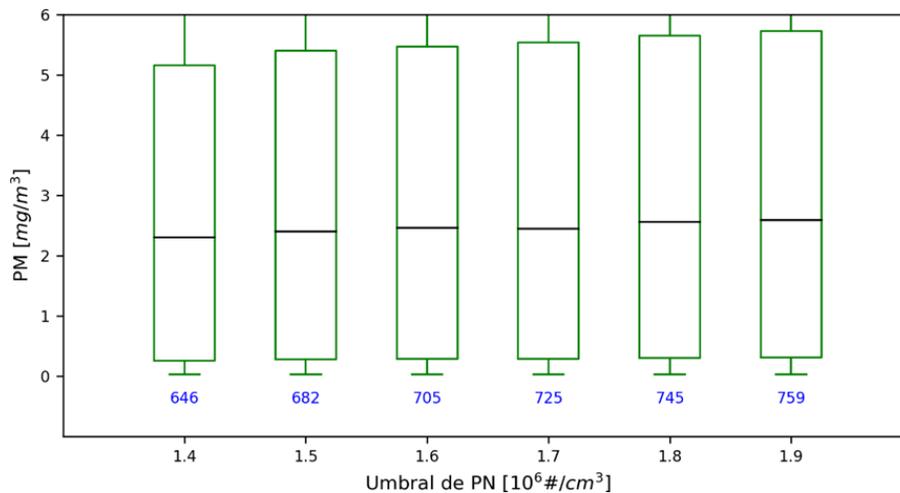


Figura 3.22 Emisión de masa de partículas vs número de partículas – vehículos aprobados (ampliación)

Finalmente, en la Figura 3.23 se presenta la proporción de aprobación o rechazo de los vehículos medidos durante el piloto de 2019, en función del umbral de concentración del número de partículas #/cm³. Aunque el umbral se reduzca hasta 1'400.000 #/cm³, la tasa de aprobación no cambia de forma significativa, pues aun así pasarían la prueba el 41.76 % de todos los vehículos medidos, es decir aproximadamente el 83.7% de los aprobados con el umbral de 2'000.000 #/cm³.

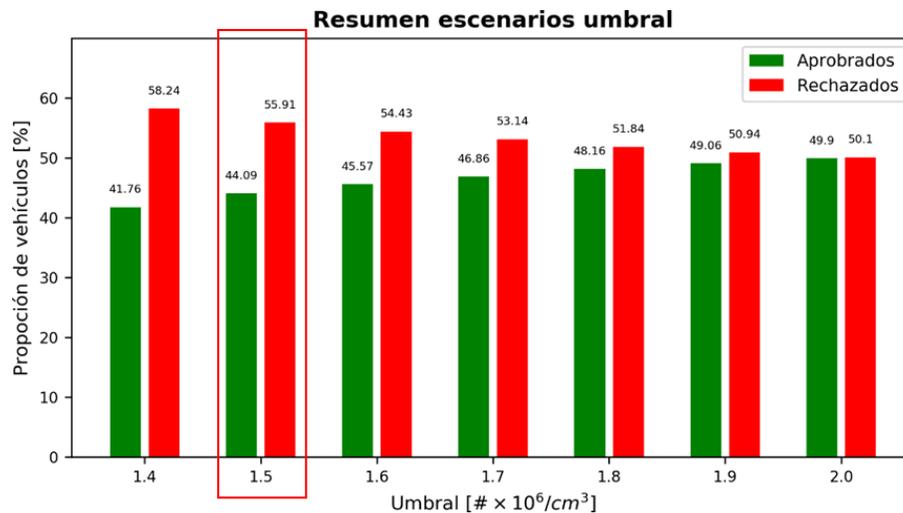


Figura 3.23. Tasa de aprobación o rechazo para los diferentes escenarios

A la luz de este análisis estadístico sobre la base de datos del primer piloto voluntario de distintivos ambientales llevado a cabo el segundo semestre de 2019, en el que independientemente de la cilindrada, del año de modelo y del kilometraje, el 75% de los vehículos aprobados estaban por debajo de 1'500.000 $\#/cm^3$, el grupo ejecutor recomienda disminuir el umbral desde 2.000.000 $\#/cm^3$ hasta este nuevo valor más restrictivo, con lo cual se tiene una prueba más estricta que beneficiará a aquellos vehículos que emiten menos partículas al ambiente.

El análisis igualmente mostró que, para los diferentes escenarios de umbrales analizados, por debajo de 2'000.000 $\#/cm^3$, la mediana de la concentración másica está entre 2 y 3 mg/m^3 , y que el 75% de los datos está por debajo de entre 5 y 6 mg/m^3 , por lo cual se recomienda en próximos pilotos similares, basarse únicamente en la concentración de número de partículas ($\#/cm^3$). A partir de vehículos modelo 2016 (identificado mediante los árboles de decisión), es cuando se tiene una tasa de aprobación significativamente mayor que la de rechazo al usar la técnica de conteo de partículas. Este resultado es interesante, porque para vehículos con tecnología de emisión Euro 4/IV o superior (mayores a 2016 en Colombia), es cuando más deficiencia presenta la prueba convencional de opacidad. En síntesis, el grupo ejecutor recomienda:

Se recomienda:

- Adoptar el nuevo umbral de 1'500.000 $\#/cm^3$ para el piloto del año 2020.
- No tener en cuenta la concentración másica de partículas como criterio de decisión para el nuevo piloto 2020.
- Dada la efectividad del método de conteo de partículas para detectar el estado mecánico y/o la correcta configuración electrónica de los motores del año de modelo 2016 en adelante, valorar la posibilidad de reemplazar la prueba de opacidad de humo contemplada en la resolución 910/2008 por la de conteo de partículas para modelos superiores a 2016.