

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
**UNIVERSIDAD
CATÓLICA**
DEL PERÚ

“Análisis de la relación entre la Potencia Específica Vehicular y las emisiones en un vehículo liviano que opera con dos composiciones de gasolina - etanol”

Tema de Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Mecánico

ANDREA ESTEFANÍA RONDÓN VILLANUEVA

ASESOR: Julio César Cuisano Egúsqiza

San Miguel, agosto del 2020



©2020, Andrea Estefanía Rondón Villanueva.

Ninguna parte de la tesis puede reproducirse o transmitirse bajo ninguna forma o procedimiento, sin el permiso escrito otorgado por el autor.

RESUMEN

En la actualidad la ciudad de Lima Metropolitana cuenta con cinco estaciones de monitoreo de la calidad de aire; sin embargo, los valores que se obtienen en determinados momentos se encuentran por encima de los valores que se consideran saludables. La principal causa de esto es el tránsito vehicular; ya que, el 60% de la contaminación en esta ciudad proviene del parque automotor.

Además, al consultar la literatura y las regulaciones existentes en el país, se ha notado que no existe un control práctico sobre las emisiones de los vehículos importados. De momento, la normativa indica que para importar un vehículo nuevo se debe presentar una Declaración Aduanera de Mercancías; la cual, debe incluir el número de homologación del vehículo a importar. Dicho número certifica las características base del vehículo que ingresa al país, incluyendo las emisiones de contaminantes.

Sin embargo, al realizar una medición en ruta de las emisiones en un vehículo liviano, se encontró que los valores son superiores a los límites establecidos por la legislación actual, la cual está basada en las recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud. Asimismo, cabe mencionar que la documentación del vehículo se encontraba vigente y este había pasado el control anual. Entonces se identificó que, uno de los puntos que explicaría las discrepancias entre la Declaración Jurada y las mediciones experimentales es que, los valores de la declaración son tomados a partir de ensayos realizados en ciclos de conducción que no reflejan la realidad del tránsito vehicular de la ciudad de Lima.

Por otro lado, uno de los parámetros utilizados en la caracterización de la relación entre el tránsito vehicular y las emisiones es la Potencia Específica Vehicular (VSP). Este parámetro fue propuesto por Jiménez-Palacios en 1999 y, de acuerdo al autor, permite realizar la comparación entre las emisiones de distintos vehículos y ciclos de conducción. Además, engloba otros factores asociados al comportamiento del vehículo. En este trabajo, dicho parámetro fue utilizado para realizar la comparación entre los ensayos realizados para dos composiciones gasolina-etanol. Esto con dos objetivos; en primer lugar, evaluar el comportamiento del VSP para el ensayo realizado en la ciudad de Lima Metropolitana y; en segundo lugar, para evaluar la diferencia en el uso de dichas mezclas gasolina-etanol.

Finalmente, a partir de los cálculos realizados se llegó a la conclusión de que el VSP es un parámetro que puede ser utilizado para caracterizar el tránsito en la ciudad de Lima; dado que, los resultados obtenidos son consecuentes con la experiencia del manejo en esta ciudad; y, el comportamiento del VSP es consistente con lo encontrado en la literatura. En cuanto a la evaluación de las composiciones gasolina-etanol, se notó que la concentración de CO_2 , CO , HC , NO_x , no presenta una variación importante entre ambos combustibles. Por otro lado, el uso de los flujos máxicos permite establecer una relación entre ambas variables. Sin embargo, se requiere que la investigación continúe para otras concentraciones gasolina-etanol para determinar si el aumento en la concentración de etanol tiene un mayor impacto en el flujo de emisiones.



TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

TÍTULO : ANÁLISIS DE LA RELACIÓN ENTRE LA POTENCIA ESPECÍFICA VEHICULAR Y LAS EMISIONES EN UN VEHÍCULO LIVIANO QUE OPERA CON DOS COMPOSICIONES DE GASOLINA - ETANOL

ÁREA : Energía

PROPUESTO POR : Dr. Julio César Cuisano Egúsquiza

ASESOR : Dr. Julio César Cuisano Egúsquiza

TESISTA : Andrea Estefanía Rondón Villanueva

CÓDIGO : 20101376

FECHA : 24 de agosto del 2020

DESCRIPCIÓN Y OBJETIVOS:

En la actualidad la ciudad de Lima Metropolitana cuenta con cinco estaciones de monitoreo de la calidad de aire; sin embargo, los valores que se obtienen en determinados momentos se encuentran por encima de los valores que se consideran saludables. La principal causa de esto es el tránsito vehicular; ya que, el 60% de la contaminación en esta ciudad proviene del parque automotor.

Además, al consultar la literatura y las regulaciones existentes en el país, se ha notado que no existe un control práctico sobre las emisiones de los vehículos importados. De momento, la normativa indica que para importar un vehículo nuevo se debe presentar una Declaración Aduanera de Mercancías; la cual, debe incluir el número de homologación del vehículo a importar. Dicho número certifica las características base del vehículo que ingresa al país, incluyendo las emisiones de contaminantes.

En el presente trabajo, se pretende hacer una evaluación del uso de la Potencia Específica Vehicular como parámetro que permite estudiar las emisiones vehiculares en la ciudad de Lima; además de poder realizar la comparación para distintos combustibles. Para esto, se utilizarán datos experimentales de mediciones previas utilizando una muestra de data correspondiente a E7.8 y E10.

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

Introducción

1. Antecedentes
2. Marco teórico
3. Procesamiento de data
4. Resultados y análisis

Conclusiones

Recomendaciones

Bibliografía

Anexos

Dr. Julio César Cuisano Egúsquiza

Asesor

DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTOS

Dedicado a mis padres, que me dieron la libertad, el apoyo y el tiempo para hacer este trabajo, y me demostraron que el valor de una persona no está solo en lo que hace.



Agradezco al profesor Julio Cuisano por su apoyo incondicional a lo largo de este largo proceso.

A la comunidad que se ha formado en Ingeniería Mecánica, cuyos lazos van más allá de la elección de carrera.

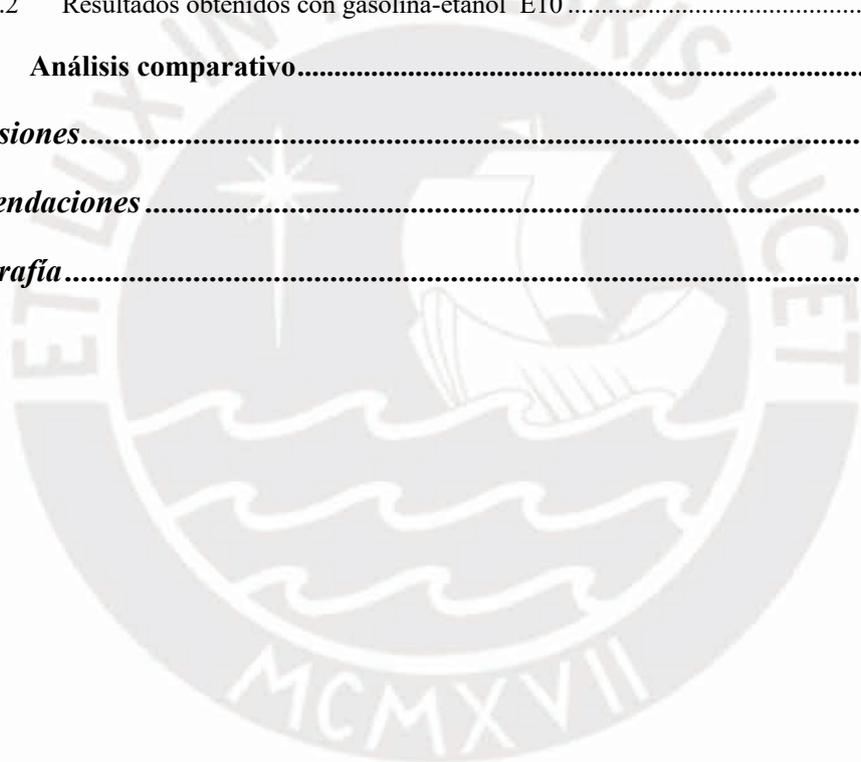
A mis amigos, que han creído en mí en momentos en los que ni yo he creído en mí misma.

Y finalmente, a mis padres y mi hermano.
Por todo.

ÍNDICE

Resumen	iii
Dedicatoria y Agradecimientos	vii
Índice	viii
Índice de tablas	x
Índice de figuras	xi
Lista de símbolos y abreviaciones	xiv
Introducción	1
I. Problemática	6
II. Propuesta solución	6
III. Justificación	6
IV. Objetivos	7
Capítulo 1: Antecedentes	8
1.1 Potencia específica vehicular	9
1.2 Metodología de implementación del VSP	13
1.3 Uso de mezclas gasolina-etanol como combustible para vehículos	16
Capítulo 2: Marco Teórico	18
2.1 Análisis termoquímico de la combustión	18
2.2 Emisiones	20
2.2.1 Óxidos de nitrógeno.....	20
2.2.2 Monóxido de carbono.....	23
2.2.3 Hidrocarburos.....	24
2.2.4 Material particulado y otras emisiones.....	25
2.3 Control de emisiones	25
2.4 Parámetros de caracterización	29

2.5	Potencia específica vehicular.....	29
Capítulo 3: Procesamiento de data.....		32
3.1	Presentación de datos.....	33
3.2	Análisis del proceso de combustión	34
3.3	Potencia específica vehicular.....	38
Capítulo 4: Resultados y Análisis		49
4.1	Análisis para cada composición de combustible	50
4.1.1	Resultados obtenidos con gasolina-etanol E7,8	50
4.1.2	Resultados obtenidos con gasolina-etanol E10	60
4.2	Análisis comparativo.....	68
Conclusiones.....		76
Recomendaciones.....		80
Bibliografía.....		81



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 0.1: Límite de contaminantes en vehículos en circulación.....	3
Tabla 0.2: Normativa para regulación de contaminantes en vehículos nuevo	4
Tabla 1.1: Coeficiente de correlación de Spearman entre emisiones y potenciales variables.....	12
Tabla 3.1: Datos iniciales	33
Tabla 3.2: Pruebas a velocidad constante.....	33
Tabla 3.3: Pruebas en condiciones de tráfico	33
Tabla 3.4: Masa molar de componentes de emisiones	36
Tabla 3.5: Valores utilizados en el cálculo del VSP	39
Tabla 3.6: Relación entre outliers y puntos para ensayos en condiciones de tránsito....	43
Tabla 3.7: Relación entre outliers y puntos para ensayos a velocidad constante (continuación).....	44
Tabla 3.8: <i>Bins</i> para VSP	47
Tabla 4.1: Resumen estadístico para ensayos con Gasohol E7.8.....	52
Tabla 4.2: Resumen estadístico de CO ₂ para mezcla gasolina-etanol al 7.8%.....	58
Tabla 4.3: Comparación de valores representativos para Gasohol 7.8.....	60
Tabla 4.4: Resumen estadístico para todos los ensayos realizados con Gasohol E10 ...	61
Tabla 4.5: Resumen estadístico de CO ₂ para mezcla gasolina-etanol al 10%.....	66
Tabla 4.6: Comparación de valores de cuartiles para Etanol 10%.....	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Mapa de estaciones monitoreo de Aire.....	1
Figura 1.1: Total de emisiones de carbono para 4 ciclos de conducción en un Jeep Cherokee de 1994.....	10
Figura 1.2: Emisiones de CO a la salida del tubo de escape vs. VSP	10
Figura 1.3: Comparación entre aceleración VSP como parámetro de comparación.....	11
Figura 1.4: Flujo de combustible vs. VSP Bin	15
Figura 1.5: Distribución de vehículos en parques automotores de distintas ciudades ...	16
Figura 2.1: Concentración de CO vs. Relación combustible/aire	23
Figura 2.2: Formación de HC durante proceso de combustión.....	24
Figura 2.3: Catalizador de panal de abeja	26
Figura 2.4: Catalizador de monolito.....	27
Figura 2.5: Variación de emisiones respecto a la relación combustible/aire	28
Figura 3.1: Variación de lambda en el tiempo para el ensayo PCT03	35
Figura 3.2: Variación de concentración de emisiones vs Lambda para el ensayo PCT03	35
Figura 3.3: Relación entre concentración y flujo másico para PCT3E7.8	37
Figura 3.4: Comparación entre VSP, velocidad del vehículo vs. Tiempo para diferentes compuestos medidos durante en ensayo PVC4E10	38
Figura 3.5: Distribución del VSP en el tiempo y desglose de factores para prueba PVC04	40
Figura 3.6: Variación de velocidad y aceleración respecto al VSP para pruebas PCT03	41
Figura 3.7: Eliminación de datos atípicos en aceleración para el ensayo PCT3E7.8.....	43
Figura 3.8: Flujo de emisiones (g/s) vs. tiempo (s) para ensayo PVC04	44
Figura 3.9: Comportamiento de CO ₂ en relación a parámetros los cinemáticos de velocidad, aceleración y VSP para ensayo PCT03.....	45
Figura 3.10: Comportamiento del CO en relación a parámetros los cinemáticos de velocidad, aceleración y VSP para ensayo PCT03.....	45
Figura 3.11: Comportamiento de HC en relación a parámetros los cinemáticos de velocidad, aceleración y VSP para ensayo PCT03.....	46

Figura 3.12: Comportamiento del NO _x en relación a parámetros los cinemáticos de velocidad, aceleración y VSP para ensayo PCT03.....	46
Figura 3.13: Distribución de flujo másico de aire vs VSP para el PCT3E7.8.....	48
Figura 4.1: Histograma, gráfica de probabilidad y diagrama de cajas para todos los ensayos con gasohol E7.8.....	51
Figura 4.2: Concentración de emisiones vs. VSP todos los ensayos realizados con Gasohol E7.8	53
Figura 4.3: Flujo de emisiones (g/s) vs VSP (kW/ton)	54
Figura 4.4: Diagrama de cajas para emisiones para todos los ensayos realizados con Gasohol E7.8	56
Figura 4.5: Distribución de flujo másico del CO ₂ por <i>bin</i>	57
Figura 4.6: Flujo másico de contaminantes vs VSP para pruebas en condiciones de tráfico vs pruebas a velocidad constante utilizando Gasohol E7.8.....	59
Figura 4.7: Histograma y gráfica de probabilidad para todos los ensayos realizados con Gasohol E10	61
Figura 4.8: Concentración de emisiones vs. VSP para mezcla gasolina-etanol 10%	62
Figura 4.9: Flujo de emisiones vs. VSP para todos los ensayos realizados con Gasohol E10.....	63
Figura 4.10: Diagrama de cajas de emisiones para todos los ensayos realizados con Gasohol E10	64
Figura 4.11: Distribución de flujo másico del CO ₂ por <i>bin</i> para pruebas con Gasohol E10	65
Figura 4.12: Flujo másico de contaminante vs VSP para pruebas en condiciones de tráfico vs pruebas a velocidad constante utilizando Gasohol E10.....	67
Figura 4.13: Comparación de concentración de emisiones vs. VSP (E7.8 vs E10) para todos los ensayos realizados.....	69
Figura 4.14: Comparación de Flujo másico de emisiones vs. VSP (E7.8 vs E10).....	70
Figura 4.15: Cuadro comparativo VSP E7.8 vs E10	71
Figura 4.16: Comparación de CO ₂ vs. VSP por <i>bin</i>	72
Figura 4.17: Comparación de CO vs. VSP por <i>bin</i>	73
Figura 4.18: Comparación de HC vs. VSP por <i>bin</i>	74
Figura 4.19: Comparación de NO _x vs. VSP por <i>bin</i>	75

Figura 4.20. Comparación en la desviación estándar entre E7.8 y E10 para todo los ensayos realizados 76



LISTA DE SÍMBOLOS

a	Aceleración (m/s^2)
A	Área frontal del vehículo
C_2H_5O	Etanol
C_D	Coefficiente de arrastre
c_{ii}	Componentes volumétricos de las emisiones
CO	Monóxido de carbono
CO_2	Dióxido de carbono
C_R	Coefficiente de resistencia a la rodadura
$E10$	Mezcla gasolina - etanol al 10%
$E7.8$	Mezcla gasolina - etanol al 7.8%
g	Aceleración de la gravedad ($9.8 m/s^2$)
H_2	Hidrógeno molecular
HC	Hidrocarburos
$K1$	Factor de conversión para el cálculo de HC
kW	Kilowatt
\dot{m}	Flujo másico de especie
m	Masa del vehículo
m.s.n.m	Metros sobre el nivel del mar
v_w	viento en contra del vehículo
N_2O	Óxido Nitroso
NO	Óxido nítrico

NO ₂	Dióxido de nitrógeno
NO _x	Óxidos de nitrógeno
O ₃	Ozono
PM	Material Particulado
ppm	partes por millón
Q ₁	Cuartil 1 (25%)
Q ₃	Cuartil 3 (75%)
SO ₂	Dióxido de azufre
ton	Tonelada
<i>v</i>	Velocidad (m/s)

LETRAS GRIEGAS

ε_i	Factor de masa
λ	Factor lambda
ρ_a	Densidad del aire a temperatura ambiente
μ	Masa molar de componente/Media
σ	Desviación estándar

LISTA DE ABREVIACIONES

AFR	Relación aire - combustible
ES	Engine stress
ETBE	Etil-ter-butilo-éter
GLP	Gas licuado de petróleo
GNV	Gas natural vehicular
IQR	Rango intercuartil
MC	Medcouple
MCI	Motor de combustión interna
MINAM	Ministerio de Ambiente
PCT	Pruebas en condiciones de tránsito
PVC	Pruebas a velocidad constante
VSP	Potencia específica vehicular

INTRODUCCIÓN

La calidad del aire que una persona respira tiene un impacto directo en la salud y calidad de vida de una persona. En la última década, han aparecido en distintas ciudades del mundo reportes y estudios que corroboran lo mencionado, y alertan de la baja en los niveles de los indicadores asociados.

Como parte de los esfuerzos por mitigar los efectos de la contaminación del aire en la ciudad de Lima, a partir del 2010 se han implementado diez estaciones de monitoreo del aire en distintos puntos de la ciudad (Ministerio del Ambiente, 2014). En la Figura 1.1 se muestra el mapa de monitoreo de aire de Lima Metropolitana, y el detalle de los valores medidos para la estación ubicada en Santa Anita. Similares resultados se observan al solicitar información para otras estaciones.

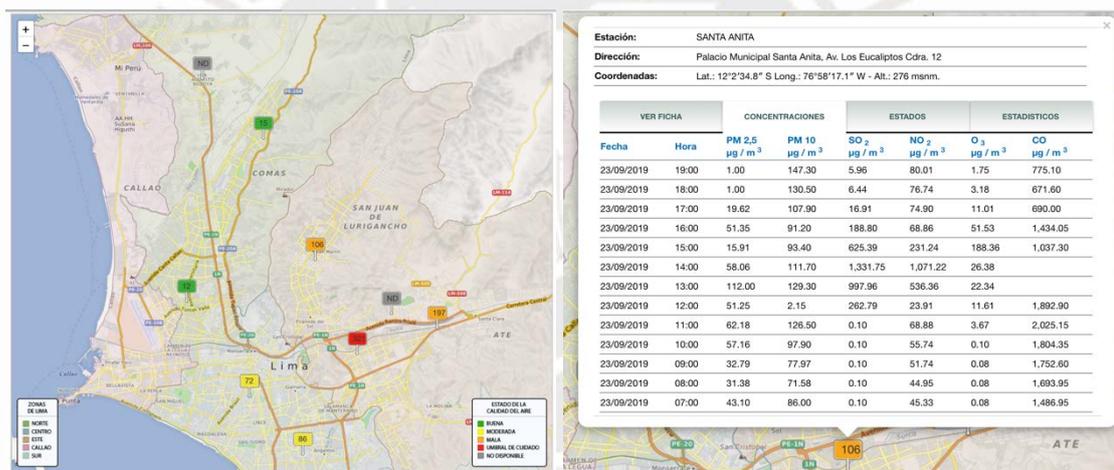


FIGURA 1.1: MAPA DE ESTACIONES MONITOREO DE AIRE
FUENTE: ADAPTADO DE SENAMHI, (2019)

Los parámetros mostrados a la derecha son los principales compuestos contaminantes asociados a la calidad del aire, y la continua exposición a los mismos es la principal causante del deterioro en la salud a causa de la contaminación del aire. Los contaminantes mencionados y sus efectos son estudiados por la World Health Organization (2005) y se presentan a continuación.

- × **Material Particulado (PM_{2.5}/PM₁₀):** Son partículas de menos de 10 y 2.5 micrones, con la capacidad de penetrar en los pulmones e ingresar al flujo sanguíneo. La exposición continua a este contaminante provoca un déficit de función pulmonar.

- × **Ozono a nivel del suelo (O₃):** Contaminante que resulta de las reacciones del NO_x con los rayos solares. Forma smog fotoquímico, el cual reduce la capacidad respiratoria y es causa de enfermedades pulmonares.
- × **Dióxido de Azufre (SO₂):** Gas que resulta de la combustión de combustibles fósiles. Su principal efecto es el ardor en los ojos, así como la inflamación del tracto respiratorio. Es uno de los principales componentes de la lluvia ácida cuando reacciona con el aire.
- × **Dióxido de Nitrógeno (NO₂):** Se trata de un gas tóxico que en altas concentraciones causa inflamación a las vías respiratorias.

Como respuesta a lo mencionado, el Gobierno del Perú ha elaborado una legislación que regula la calidad del aire; la cual, inicia en el año 2001 con la publicación del Decreto Supremo N° 003-2001-MINAM en el que se establecieron los valores máximos que deben tener los principales contaminantes asociados a la calidad del aire. Esto tomando como base a los valores establecidos por la Organización Mundial de la Salud. Dicha norma fue mejorada en el 2008 y más adelante, en el 2016 se estableció el Índice de Calidad del Aire (INCA); con el cual, se busca establecer un valor representativo de la calidad del aire en la ciudad. Finalmente, en el 2017 se establece el Decreto Supremo N° 003-2017-MINAM que se encuentra vigente a la fecha, en el cual se resume la legislación actual respecto a la calidad del aire en el País.

Sin embargo, para poder regular y ejercer control sobre la calidad del aire en Lima Metropolitana se deben identificar los factores con mayor influencia en los valores medidos. Esto fue realizado en el año 2014 en el Informe Nacional de la Calidad del Aire elaborado por el Ministerio del Ambiente (2014); en el que, se identificó que para la ciudad de Lima, las fuentes principales son el parque automotor y el sector industrial.

El parque automotor, de acuerdo con un reporte presentado por el Diario Oficial El Peruano (2019), es de 2.6 millones de vehículos. Este tiene un porcentaje de renovación del 6% (Cóndor, 2019) y está compuesto en un 85% por vehículos livianos (Diario Oficial El Peruano, 2019).

Esto hace del parque automotor de la capital el principal objeto de interés para el control de la calidad del aire. Para su regulación, en el 2012 se estableció el Decreto Supremo N° 009-2012-MINAM en el que se establecen los límites a los que están sujetos los vehículos

que actualmente circulan por la ciudad; así como, las regulaciones de los vehículos importados. La Tabla 0.1 muestra un extracto de dicha norma, en la sección correspondiente a vehículos livianos de motor de encendido por chispa que funcionan a gasolina, GLP y gas natural que se encuentran en circulación.

TABLA 0.1: LÍMITE DE CONTAMINANTES EN VEHÍCULOS EN CIRCULACIÓN
FUENTE: ADAPTADO DE MINAM, (2012)

Año de Fabricación	Altitud (m.s.n.m.)	CO (% de volumen)	HC (ppm)	CO + CO₂ (% mínimo)
Hasta 1995	0 a 1800	3.0	400	10 ⁽¹⁾
	> 1800	3.0	450	8
1996 a 2002	0 a 1800	2.5	300	10 ⁽¹⁾
	> 1800	2.5	350	8
2003 en adelante	a cualquier altitud	0.5	100	12 ⁽¹⁾

(1) Solo para GLP/GNV el valor mínimo de CO + CO₂ será de 8%

Para comprobar la ejecución de esta norma, los vehículos en circulación están sujetos a una revisión técnica anual en la cual se realiza la medición de emisiones. El procedimiento de medición se encuentra en el decreto mencionado.

En cuanto a vehículos que ingresan al parque automotor, tanto nuevos como usados, la norma correspondiente a automóviles de más de 2.5 toneladas y menos de 6 asientos se puede encontrar en la Tabla 0.2. El control del cumplimiento de dicha norma está regulado por la Superintendencia Nacional de Administración Tributaria (SUNAT) y el Ministerio de Transportes y Comunicaciones; cuyas fuentes confirman que, para el ingreso de un vehículo nuevos se requiere la presentación de dos documentos: la consignación del número del registro de Homologación y características registrables en la Declaración Aduanera de Mercancías; y, una constancia del fabricante o representante en el país de que el vehículo en cuestión se encuentra homologado. Se asume que, dentro de dichas características se incluye información respecto a las emisiones contaminantes.

Sin embargo, al no existir un procedimiento de homologación a partir de ensayos experimentales, no se puede comprobar con certeza lo mencionado en la Declaración Jurada. Esto tiene como consecuencia que no se puede comprobar si los vehículos que ingresan al país cumplen o no con la normativa establecida por Decreto Supremo N° 009-2012-MINAM, cuyo extracto se muestra en la Tabla 0.2.

TABLA 0.2: NORMATIVA PARA REGULACIÓN DE CONTAMINANTES EN VEHÍCULOS NUEVO
 FUENTE: ADAPTADO DE MINAM, (2012)

Año aplicación (**)	Norma	Directiva	Tipo de motor / encendido	CO [g/km]	HC + NO_x [g/km]	HC [g/km]	NO_x [g/km]	PM [g/km]
2003 - 2006	EURO II o mayor	94/12/EC	Gasolina	2.20	0.50	-	-	-
			Diésel IDI	1.00	0.70	-	-	0.08
			Diésel DI	1.00	0.90	-	-	0.10
2007 - 2015	EURO III o mayor	98/69/EC (A)	Chispa	2.30	-	0.20	0.15	-
			Compresión	0.64	0.56	-	0.50	0.05
2016 - adelante	EURO IV o mayor	98/69/EC (A) y 2002/80/EC	Chispa	1.00	-	0.10	0.08	-
			Compresión	0.50	0.30	-	0.25	0.025

**Nota: A partir de EURO IV los vehículos de pasajeros solo se clasifican por peso.

Por otro lado, incluso si se llega a realizar la homologación vehicular, esta información no es suficiente para poder determinar el comportamiento que tendrían los vehículos (y sus emisiones) una vez entren en funcionamiento. Esto debido a que, de momento no se tiene un patrón que represente la dinámica del tránsito de la ciudad de Lima.

Otro punto a tener en cuenta en el tratamiento de emisiones es el combustible que se utiliza en los vehículos. Actualmente, la mayoría de vehículos livianos que transitan en la ciudad de Lima son vehículos a gasolina, en el 2018 el 75% de los vehículos nuevos importados fueron vehículos a gasolina (Aduanas, 2018); lo que es consecuente con el hecho de que, en el mismo año, la importación de gasolina subiera a 8428.9 millones de barriles que es un valor que viene en constante aumentos desde el 2014 (Osinermin, 2018).

En cuanto a la gasolina, se trata de un combustible fósil resultado del refinamiento del petróleo (Osinermin, 2017). Esto significa que, al ser derivado de petróleo, es una fuente energética no renovable con un alto impacto ambiental. Es por este motivo, que una de las alternativas propuestas al uso de la gasolina es su mezcla con combustibles provenientes de fuentes renovables como la mezcla etanol-gasolina.

El uso de biocombustibles se remonta al diseño inicial de motores de combustión interna como es el caso del Ford Modelo T (Tin Lizzy) el cual usaba etanol como combustible. Luego, durante la crisis del aceite, se inicia el uso de mezclas de gasolina con biocombustibles. Es el caso de Brasil que, a partir de la década del 70 incrementó su

producción de etanol para disminuir la dependencia en combustibles de origen mineral (Reijnders & Huijbregts, 2009).

En cuanto al máximo porcentaje de etanol que se puede utilizar en un motor sin necesidad de modificarlo, de acuerdo al Worldwide Fuel Charter (ACEA, Auto Alliance, AMA, & JAMA, 2013) se puede utilizar una mezcla gasolina-etanol con 10% de etanol. El trabajo actual pretende hacer un análisis del funcionamiento de un vehículo que opera con etanol al 10% (a partir de este momento E10) de acuerdo a la recomendación hecha y la mezcla gasolina-etanol al 7.8% (E7.8) que es comercializado a nivel nacional bajo la denominación de gasohol.

El trabajo de tesis que se presenta a continuación está compuesto por cuatro capítulos y se presentará en dos partes con la siguiente estructura. En primer lugar, con el primer capítulo, la autora pretende establecer un cuerpo de conocimiento base en el que se muestre el estado actual de los temas de interés para el trabajo de tesis. El cual está formado por la información relevante de la tecnología a utilizar, así como los conceptos y métodos existentes. Además, se presentan sus beneficios y limitaciones, de modo que el lector pueda formar una opinión respecto al tema y proceder. En segundo lugar, ese presenta de forma breve los conceptos teóricos asociados al trabajo realizado de forma que el procedimiento efectuado pueda ser entendido en su totalidad. Ambos capítulos en conjunto representan el fundamento teórico del presente trabajo a partir del cual se realizó el análisis propuesto.

En la segunda parte se presenta el procedimiento realizado para la obtención de datos y el análisis de resultados obtenidos. En primer lugar, el tercer capítulo muestra la aplicación de los conceptos explicados en la primera parte de forma sistemática desde los datos obtenidos hasta la obtención de resultados. Se presenta un modelo de cálculo para sets un set de data como ejemplo. Finalmente, en el cuarto capítulo, se presentan los resultados obtenidos, en su mayoría de forma gráfica; así como, la interpretación y análisis de lo que dichos resultados representan en el marco de los objetivos planteados al inicio de este trabajo.

I. Problemática

Para poder tomar decisiones respecto a medidas de control de la calidad del aire en una ciudad; en primer lugar, se debe obtener data de las principales fuentes de emisiones de la ciudad. En el caso de Lima Metropolitana un gran contribuyente es el parque automotor; por lo que, si se quiere realizar un inventario de emisiones para poder tomar acción, se tiene que conocer el comportamiento de los vehículos, y las emisiones asociadas. Actualmente, no se cuenta con dicha data.

Otro punto a tener en cuenta es el ingreso de vehículos al país; puesto que, el control de las emisiones de dichos vehículos permite establecer una línea base a partir de la cual se pueda estimar el comportamiento futuro de las emisiones. Como se ha mencionado, el control actual de emisiones de vehículos depende exclusivamente de la declaración jurada presentada por el importador.

Además, existe la problemática de la búsqueda de reemplazo de combustibles fósiles. En el caso de Perú, existe producción y exportación de etanol a partir de la caña de azúcar y, venta de gasohol. Sin embargo, no hay estudios del impacto en las emisiones vehiculares del uso de la mezcla gasolina-etanol en las condiciones de tránsito de Lima Metropolitana.

II. Propuesta solución

Para poder abordar los tres puntos mencionados, se propone la realización de un estudio exploratorio del comportamiento de las emisiones vehiculares en un vehículo liviano que funciona con una mezcla gasolina-etanol en dos composiciones, E7.8% y E10%. Además, se propone el uso de la Potencia Específica Vehicular (VSP en adelante) como parámetro de análisis.

III. Justificación

En cuanto al primer punto, un estudio exploratorio permite hacer un reconocimiento inicial del comportamiento de vehículos en Lima Metropolitana y, dado que los vehículos livianos representan el 85% del parque automotor, la elección de un vehículo de esas características es una representación adecuada. Respecto a la importación de vehículos, el presente trabajo pretende servir como una muestra inicial sobre la diferencia entre las emisiones declaradas por los fabricantes y los valores reales que emiten los vehículos en funcionamiento. Finalmente, el estudio del comportamiento de un vehículo representativo

de la flota vehicular con un mayor porcentaje de etanol permitirá mostrar el comportamiento de un vehículo no modificado para un porcentaje mayor de etanol. Esto en el marco de lo que futuros estudios puedan encontrar al respecto.

Por otro lado, la propuesta del uso del VSP como parámetro de análisis parte de la necesidad de un parámetro que pueda englobar distintas características propias del tránsito vehicular y del vehículo en cuestión; y que, a su vez tenga relación con las emisiones vehiculares.

| IV. Objetivos

OBJETIVO GENERAL

Analizar la relación entre Potencia Específica Vehicular y emisiones contaminantes de un vehículo liviano que circula en Lima Metropolitana y opera con dos composiciones de gasolina – etanol (E7.8 y E10).

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- × Calcular el flujo másico e indicadores de emisiones a partir de la data obtenida.
- × Determinar y obtener las variables necesarias para el cálculo del VSP. Identificar cuales provienen directamente de la data experimental y cuales deben ser calculadas.
- × Realizar el análisis de las relaciones entre las emisiones vehiculares para cada una de las composiciones de la mezcla gasolina-etanol.
- × Comparar los resultados obtenidos para cada una de las mezclas, así como para las condiciones cinemáticas ensayadas.
- × Establecer un procedimiento de estimación de emisiones con base en la regresión lineal para evaluar la proyección del comportamiento de las emisiones para el vehículo ensayado.

Capítulo 1: Antecedentes

Para poder caracterizar el comportamiento de las emisiones vehiculares en una ciudad, existen diversos factores que se deben tomar en cuenta como: el tamaño de la flota vehicular, el diseño de calles, el tráfico y los patrones de manejo (Ericsson, 2001). En la actualidad, dicha evaluación se hace a través de programas de modelamiento de emisiones y ciclos de conducción representativos. Un ciclo de conducción es en esencia, la representación de la dinámica de operación de un vehículo en condiciones reales para un área determinada (Geetha & Subramani, 2019). En la actualidad, existen ciclos de conducción para distintas partes del mundo como: Asia, Australia, Europa y Estados Unidos; los cuales, poseen distintas clasificaciones: Urbano, Sub-urbano, carretera, etc. Cada uno de ellos pretende simular distintas condiciones de funcionamiento de vehículos (Tong & Hung, 2010).

Entonces, es a partir de los resultados obtenidos en dichos ciclos de conducción, que se realiza el modelado de emisiones en otras partes del mundo. Sin embargo, en muchos casos, las ciudades en cuestión no tienen a las mismas características de tránsito que modeladas por el ciclo (Jaikumar, Shiva Nagendra, & Sivanandan, 2017). Este es el caso de Lima Metropolitana que, al ser la capital de un país en vías de desarrollo posee un flujo de tránsito irregular, por lo que se deben obtener parámetros que representen las variables mencionadas, si se quiere realizar una proyección de emisiones que represente la situación actual de la ciudad.

Dentro de los parámetros utilizados para caracterizar emisiones se encuentra la Potencia Específica Vehicular (VSP), un parámetro cinemático propuesto por Jiménez-Palacios (1999), que permite establecer una relación entre las emisiones y el comportamiento cinemático vehicular. Se trata de uno de los principales valores a tener en cuenta al momento de realizar el modelamiento de emisiones en una ciudad, y en el caso de Lima Metropolitana tiene especial importancia dada la diversidad de vehículos del parque automotor. La cual se traduce en condiciones de tránsito distintas a las modeladas por los ciclos de conducción existentes.

En este capítulo se presentan los resultados de distintas investigaciones respecto al modelamiento de emisiones con ayuda del VSP. Esto con el objetivo de que el lector pueda comprender como esta metodología se aplica a la ciudad de Lima; y, porqué es importante en el marco de la proyección de emisiones para el mejoramiento de la calidad del aire. Además, se presenta el panorama actual de la proyección de emisiones en Lima Metropolitana, puesto que si existen inventarios y proyecciones de emisiones, como los trabajos presentados por Dawidowski, Sánchez-Ccoyllo, & Alarcón, (2014) y Davis, Lents, Osses, Nikkila, & Barth, (2005).

En la segunda parte del capítulo, se presenta la investigación existente respecto al uso de etanol en mezclas de combustible.

1.1 POTENCIA ESPECÍFICA VEHICULAR

Definido por Jiménez-Palacios (1999) como la potencia instantánea por unidad de masa del vehículo, es un parámetro que tiene la capacidad de predecir con alta precisión el comportamiento de las emisiones vehiculares. Además, se trata de un parámetro que puede ser medido directamente y se adapta a los métodos existentes de evaluación de vehículos. Sin embargo, su mayor fortaleza está en permitir la comparación entre distintos vehículos y ciclos de conducción como se muestra a continuación.

Para poder sustentar la validez del parámetro propuesto, Jiménez-Palacios (1999) realizó una serie de pruebas en distintos ciclos como son el *Federal Test Procedure* (FTP), *Inspection and maintenance Driving Cycle* IM240, US06 Supplemental Federal Test Procedure (SFTP), etc.; así como, en estudios de detección de emisiones remota como los realizados en Los Ángeles y Chicago. En la Figura 1.1 se observa los resultados de la

caracterización de emisiones realizada en un Jeep Cherokee de 1994 para distintos ciclos de conducción.

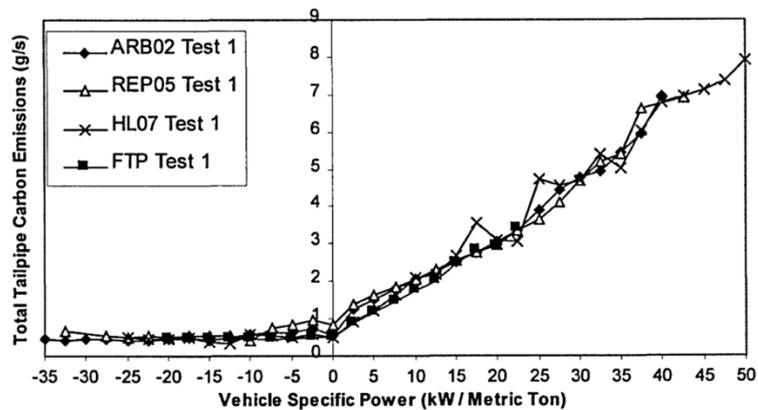


FIGURA 1.1: TOTAL DE EMISIONES DE CARBONO PARA 4 CICLOS DE CONDUCCIÓN EN UN JEEP CHEROKEE DE 1994
FUENTE: JIMÉNEZ-PALACIOS (1999)

La Figura 1.1 muestra que existe un comportamiento uniforme a pesar de tratarse de distintos ciclos de conducción. Motivo que reafirma la utilidad del VSP como parámetro de caracterización de emisiones. En caso mostrado, sin embargo, cabe mencionar que los ciclos en cuestión son todos ciclos correspondientes a los Estados Unidos.

Asimismo, no es solo entre ciclos de conducción que se puede establecer una comparación, sino también entre distintos vehículos, prueba de esto se presenta en la Figura 1.2. Este resultado, en conjunto con el anterior, colocan al VSP como un parámetro que cumple con las propiedades iniciales necesarias para la caracterización de emisiones de una ciudad.

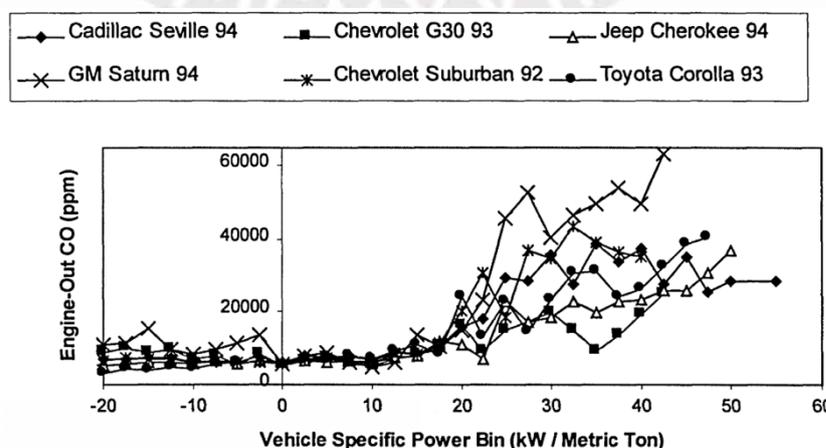


FIGURA 1.2: EMISIONES DE CO A LA SALIDA DEL TUBO DE ESCAPE VS. VSP
FUENTE: Jiménez-Palacios (1999)

En la Figura 1.2 se observa que, si bien cada vehículo muestra valores independientes, todos siguen una tendencia similar, la cual se observa también en la Figura 1.1, en la que el VSP muestra una tendencia lineal con valores cercanos a cero hasta un punto a partir del cual se incrementan.

En cuanto a la efectividad del VSP en relación otros parámetros utilizados para caracterizar emisiones, Jiménez-Palacios (1999) realizó la comparación para un mismo set de datos de emisiones, entre la velocidad, aceleración y el VSP, y su relación con los valores obtenidos. Asimismo, estudios posteriores han verificado dicha relación, como el realizado por Rodríguez, Virguez, Rodríguez, & Behrentz (2016), en el cual se reafirma al VSP como un mejor predictor del comportamiento de emisiones. En la Figura 1.3 se presenta los resultados obtenidos por Rodríguez et al. (2016) para el caso del CO₂.

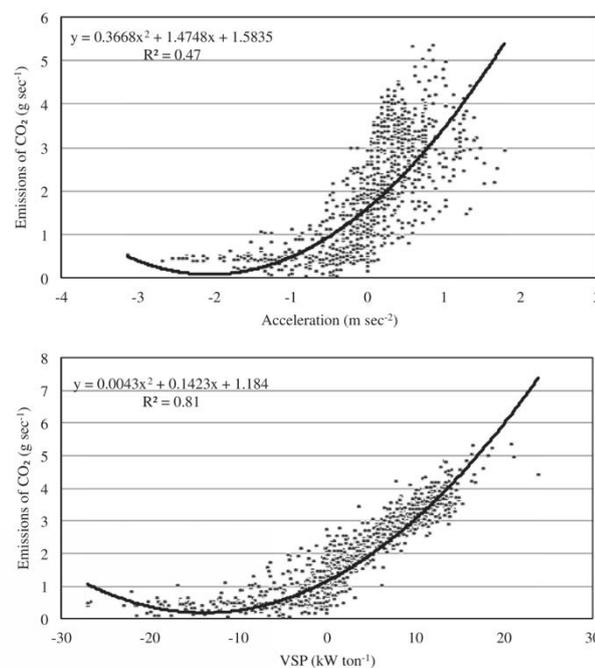


FIGURA 1.3: COMPARACIÓN ENTRE ACELERACIÓN VSP COMO PARÁMETRO DE COMPARACIÓN
FUENTE: RODRÍGUEZ ET AL. (2016)

La Figura 1.3 muestra una comparación entre el VSP y la aceleración, en relación con el flujo másico del CO₂; y, a pesar de que ambos parámetros presentan la misma tendencia, el VSP permite un mejor ajuste de la curva representativa. Lo cual, permite realizar una proyección del CO₂ en el caso mostrado. Esto reafirma la posición del VSP como un parámetro adecuado para la caracterización de emisiones. Para el caso de otras especies de emisiones como el CO, HC y NO_x, otros autores han encontrado comportamientos similares. Uno de dichos estudios fue el realizado por Zhai, Frei & Roupail (2008),

quienes evaluaron en 12 buses la relación monótonica de distintos parámetros con las emisiones utilizando el coeficiente de correlación de Spearman. El resultado fue la selección del VSP debido a que entre las alternativas era el más accesible, en la Tabla 1.1 se muestran los resultados obtenidos por los autores.

TABLA 1.1: COEFICIENTE DE CORRELACIÓN DE SPEARMAN ENTRE EMISIONES Y POTENCIALES VARIABLES.
FUENTE: ADAPTADO DE ZHAI ET AL. (2008)

Variable potencial	CO2 (g/s)	CO (g/s)	NOx (g/s)	HC (g/s)
Velocidad (mph)	0.44	0.37	0.35	0.36
Aceleración (mph/s)	0.72	0.55	0.65	0.34
Potencia específica vehicular (kW/ton)	0.78	0.53	0.74	0.33
Flujo de combustible (g/s)	0.93	0.66	0.90	0.49
Apertura de válvula mariposa (%)	0.90	0.72	0.85	0.54
Torque (lbf-ft)	0.91	0.61	0.90	0.44
RPM	0.72	0.66	0.55	0.55
Potencia de motor (bhp)	0.92	0.64	0.90	0.47

En la tabla se observa que el VSP obtiene valores similares a otras variables como el flujo de combustible y la apertura de la válvula o el torque del motor. Sin embargo, y en concordancia con lo mencionado por los autores, estas variables no son tan fáciles de obtener en práctica para vehículos en funcionamiento. Por este motivo y a pesar de presentar una mejor correlación con algunas especies contaminantes que en otras, es que se considera un buen parámetro para la evaluación de emisiones. Asimismo, este hecho se deberá tomar en cuenta al momento de realizar el análisis de resultados.

Por otro lado, queda pendiente la ubicación del VSP en contexto con otros factores que afectan el uso de combustible y la emisión de gases de escape, lo cual se presenta a continuación.

En primer lugar, se debe establecer cuales son los factores que afectan las emisiones además del VSP. Como se mencionó al inicio del capítulo, Ericsson (2001) en su investigación establece una serie de parámetros y la magnitud de su efecto en las emisiones, de la misma forma que lo hacen Corvalán, Osses, Urrutia, & González (2005) y Nesamani, Saphores, McNally, & Jayakrishnan (2017). Los parámetros comunes en las

fuentes consultadas son: la calidad de las vías, el diseño de las calles, los patrones de manejo y las características del parque automotor. Y, es entre dichos factores que Ericsson (2001), a través de una evaluación experimental llega a la conclusión de que, entre los parámetros independientes encontrados, aquellos que se encuentran asociados a la aceleración, demanda de potencia, velocidad y cambio de marchas son los que tienen un mayor efecto en el consumo de combustible y emisiones de gases de escape. Factores que son tomados en cuenta en el cálculo del VSP.

Por otro lado, en la investigación realizada por Nesamani et al. (2017) los autores amplían el set de factores presentado por Ericsson (2001) y pone dichos factores en el contexto de una ciudad. El resultado de dicha investigación presenta tres factores principales que afectan los valores de las emisiones, estos son: el límite de velocidad, el estado de las vías y el estilo de manejo. Finalmente, dentro del trabajo presentado por Corvalán et al. (2005) se puede observar el énfasis en las características del parque automotor de distintas regiones de Chile en las emisiones. Además, presenta variables demográficas y socioeconómicas como el tamaño de la población y el ingreso promedio por familia, esto en conjunto con el consumo de combustible y los kilómetros de vías. Estos resultados proponen un enfoque alternativo en el modelamiento de emisiones de una ciudad.

Dichos factores, en su mayoría se encuentran representados en el VSP, lo que corrobora lo mencionado por Jiménez-Palacios (1999) respecto al impacto y eficacia en el cálculo de emisiones. Sin embargo, implica que los valores del VSP obtenidos en las pruebas realizadas por Jiménez-Palacios (1999) no pueden ser aplicados para el cálculo de emisiones en Lima Metropolitana; ya que, los ciclos de conducción utilizados no son representativos de las condiciones de tránsito de la ciudad. De hecho, actualmente Lima no cuenta con un ciclo de conducción estándar, lo cual no quiere decir que no se pueda obtener información respecto al tránsito de la ciudad a través del VSP, teniendo en cuenta que dicho análisis ha sido realizado en ciudades con situaciones de tránsito similares como Bogotá (Rodríguez et al., 2016) y Chennai (Jaikumar et al., 2017).

1.2 METODOLOGÍA DE IMPLEMENTACIÓN DEL VSP

Una vez calculado el VSP, existen distintas rutas para poder realizar el análisis de las emisiones; y si bien se ha demostrado que se trata de un parámetro bastante completo, este por si solo no es suficiente para describir el comportamiento de las emisiones debido

a los diversos factores que las afectan. Para esto, las implementaciones tanto en Bogotá como en Chennai utilizan un método de desarrollo similar al utilizado por programas de modelado de emisiones como el MOVES o IVE. Dicho método consiste en la segmentación de valores obtenidos en *bins* para poder analizar su comportamiento de forma individual.

En el caso del trabajo de Rodríguez et al. (2016) el procedimiento realizado fue tomado del manual del modelo IVE (2008), por lo que el análisis incluyó el parámetro de *Engine Stress* (ES) en la elaboración de los *bins*. La división consiste de 20 *bins* para el VSP en combinación con 3 *bins* para el ES, lo que resulta en 60 *bins* en total. Por otro lado, Jaikumar et al. (2017) desarrollaron un modelo de *binning* asociado al modo de funcionamiento del vehículo (ralentí, velocidad crucero, rápida aceleración o desaceleración). El análisis fue realizado a partir de 9 *bins* con valores desde -10 hasta 11+. Es a partir de dicha segmentación que ambos estudios toman distintos enfoques para el análisis de las emisiones en los vehículos ensayados.

Rodríguez et al. (2016) presentaron un análisis desde el punto de vista estadístico con resultados obtenidos a partir de la obtención de la función de densidad de probabilidad de los datos obtenidos. Esta, fue evaluada a través del test de Anderson-Darling, que determina si se trata de una distribución normal o no, para luego ser implementada con la ayuda de simulaciones de Montecarlo. Como resultado de esto se obtuvieron curvas que permiten estimar los flujos de emisiones para cada *bin* de VSP. Un ejemplo de los resultados obtenidos se ha mostrado en la Figura 1.3. Por otro lado, Jaikumar et al. (2017) tienen un acercamiento para el análisis y estimación a partir de redes neurales con un enfoque en los *bins* correspondientes a los modos de operación en ralentí, y bajas velocidades. Esto debido a las condiciones de tráfico de la ciudad en cuestión. En la Figura 1.4 se muestra los flujos de emisiones para el monóxido de carbono e hidrocarburos en relación a los *bins* establecidos. Se puede observar el enfoque presentado respecto al tiempo de ralentí y bajas velocidades en la barra correspondiente al valor 0 que es el *bin* en cuestión.

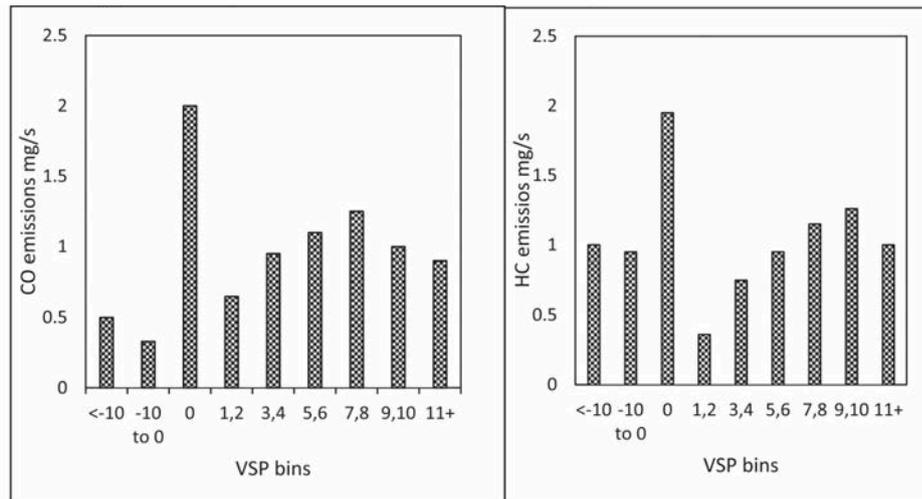


FIGURA 1.4: FLUJO DE COMBUSTIBLE VS. VSP BIN
FUENTE: JAIKUMAR ET AL. (2017)

En el caso de la ciudad de Lima se ha mencionado que también se han realizado estudios de emisiones orientados a la realización de un inventario. Uno en particular utilizó el VSP, realizado por Davis et al. (2005) y otro realizado por Dawidowski et al. (2014) quien utiliza el modelo LEAP para realizar dicha estimación. Ambos estudios tienen alcances distintos, mientras que Davis et al. (2005) presentaron el proceso de recolección de datos previa a la estimación de emisiones, Dawidowski et al. (2014) realizaron una estimación del inventario actual, así como una proyección de la reducción de emisiones al 2030 basado en la renovación del parque automotor, entre otros factores.

Dado que el estudio realizado por Davis et al. (2005) tiene como objetivo presentar la recolección de datos de campo necesaria para elaborar un inventario de emisiones utilizando el modelo IVE, se puede analizar la diferencia entre las características del parque automotor de Lima con el de otras ciudades como Los Ángeles, Nairobi o México. Esto permite observar con mayor detalle lo mencionado por Jaikumar et al. (2017) respecto a como la diferencia en el parque vehicular afecta los modelos de emisiones existentes. En la Figura 1.5, se muestra una comparación de la distribución vehicular en las ciudades del estudio realizado.

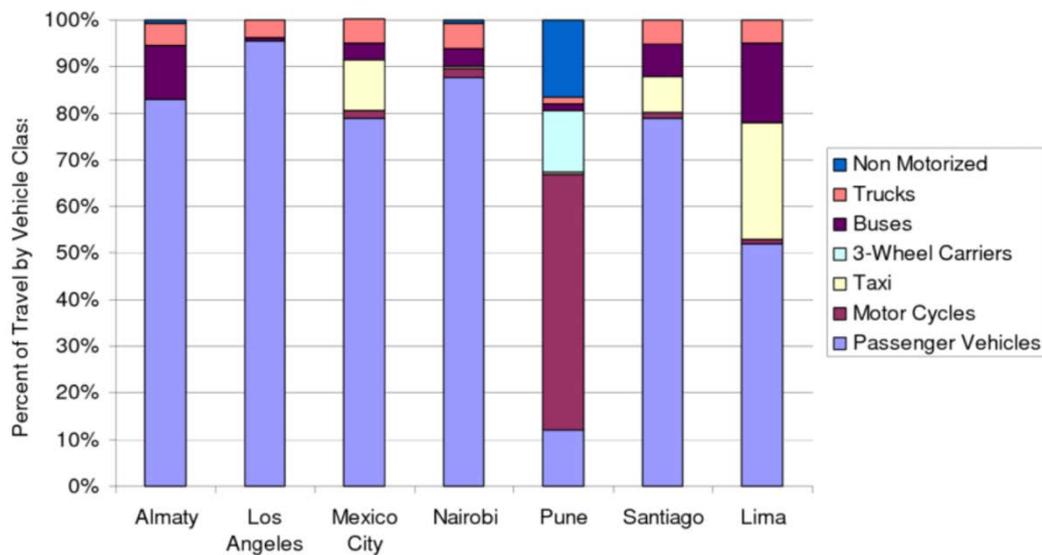


FIGURA 1.5: DISTRIBUCIÓN DE VEHÍCULOS EN PARQUES AUTOMOTORES DE DISTINTAS CIUDADES
FUENTE: DAVIS ET AL. (2005)

Se puede observar en la figura que, en el caso de Lima, el mayor porcentaje de vehículos corresponde a vehículos de pasajeros; sin embargo, este porcentaje es solo un poco mayor al 50%, lo cual tiene un fuerte contraste con las ciudades de Santiago de Chile (~78%), Los Ángeles (~95%) o Nairobi (~87%).

Mientras tanto, el estudio realizado por Dawidowski et al. (2014) utiliza el modelo LEAP para realizar la proyección de emisiones bajo distintos escenarios. Se debe tener en cuenta que, para este estudio se utilizó como año base el 2003 y se proyectaron los ingresos y retiros del parque automotor. Los autores recomiendan que, para futuras investigaciones, se utilicen datos de fechas más cercanas al año del estudio para poder obtener resultados que se acerquen a la realidad de la ciudad.

1.3 USO DE MEZCLAS GASOLINA-ETANOL COMO COMBUSTIBLE PARA VEHÍCULOS

En cuanto al control de emisiones en relación con el combustible utilizado, la búsqueda de alternativas a los combustibles fósiles ha llevado al estudio del uso de biocombustibles. En la actualidad, el compuesto orgánico que más se utiliza como aditivo es el etanol; asimismo, este también es materia prima para otros compuestos como el etil-ter-butilo-éter (ETBE), los cuales sirven para mejorar el desempeño de los combustibles fósiles (Aakko-Saksa, Rantanen-Kolehmainen, Koponen, Engman, & Kihlman 2011).

Para evaluar el funcionamiento del etanol como alternativa de combustible se ha encontrado en la literatura dos formas de abordar el tema: A través pruebas de motor en un banco de prueba; y por otro lado, pruebas en ciudad con ayuda de vehículos equipados para obtener los datos necesarios. En el trabajo actual, el enfoque está en el funcionamiento de vehículos en la ciudad de Lima, por lo que el segundo grupo de trabajos consultados es el más relevante. Sin embargo, se ha consultado los trabajos de Barakat, Awad, & Ibrahim (2016), Tipian (2015) y Schirmer et al. (2017) como punto de partida y comparación con los estudios existentes del segundo grupo. En conjunto, los estudios mencionados muestran una disminución en la concentración de emisiones de HC y CO conforme aumenta el contenido de oxígeno en la mezcla (Tipian, 2015), mientras que la cantidad de NO_x tiene mayor relación con el factor lambda y la relación aire-combustible (Da Silva, De Menezes, & Cataluña, 2008).

En cuanto a los estudios con vehículos en funcionamiento, los resultados mostraron una reducción en las emisiones de carbono en comparación con vehículos a gasolina sin etanol. El primer estudio realizado por Hernandez, Menchaca & Mendoza (2014) en siete vehículos, muestra una reducción en las emisiones por km recorrido para todos los vehículos híbridos ensayados versus los vehículos con combustible convencional. Cabe observar, que en esta investigación, para el caso del NO_x se observa una situación similar a la mencionada por Da Silva et al (2008) en cuanto a la no dependencia de dicho compuesto de la cantidad de etanol. En la investigación de Hu et al. (2012), realizada en Beijín, se observó un comportamiento similar al anterior; sin embargo, en este caso, para el NO_x los valores obtenidos fueron mucho más altos que en el caso de los vehículos a gasolina.

Capítulo 2:

Marco Teórico

A continuación, se presentan los conceptos previos que se requieren para poder realizar un análisis de emisiones utilizando el concepto del VSP. El capítulo está compuesto por tres partes y tiene la siguiente estructura. La primera parte presenta el análisis termoquímico del proceso de combustión utilizado, los parámetros que intervienen y conceptos asociados. Esto servirá como base para el procesamiento de la data obtenida en el siguiente capítulo. En la segunda parte, se muestran los conceptos asociados a la formación y comportamiento de las especies principales que conforman las emisiones del tubo de escape. Lo cual, permitirá comprender y analizar a mayor profundidad los resultados obtenidos; así como, establecer una línea de referencia para comprobar su validez. Finalmente, en la tercera parte se presenta la fórmula a utilizar en el cálculo del VSP, así como los valores necesarios para su obtención.

2.1 ANÁLISIS TERMOQUÍMICO DE LA COMBUSTIÓN

Para realizar el análisis de combustión, lo primero que se tuvo en cuenta es la composición del combustible. En el caso del etanol, la fórmula es la siguiente C_2H_5O . Lo que implica que la composición final del gasohol, es distinta a la de la gasolina genérica, puesto que tiene oxígeno en su composición. Esto lleva a considerar una forma distinta de abordar el proceso de análisis. La metodología en cuestión fue propuesta por Kuranc (2015), y consta del balance de la ecuación, el cálculo de lambda, las relaciones aire-combustible y los flujos másicos asociados. A continuación, se muestra la ecuación de balance (2.1) que se utilizará en este trabajo.

$$C_{\beta}H_{\alpha}O_{\varepsilon} + \lambda \cdot \left[\beta + \frac{\alpha}{4} - \frac{\varepsilon}{2} \right] \cdot O_2 + \frac{78}{21} \cdot \lambda \cdot \left[\beta + \frac{\alpha}{4} - \frac{\varepsilon}{2} \right] \cdot N_2 + \frac{1}{21} \cdot \lambda \cdot \left[\beta + \frac{\alpha}{4} - \frac{\varepsilon}{2} \right] \cdot Ar \rightarrow$$

$$\beta \cdot CO_2 + \frac{\alpha}{2} H_2O + \frac{78}{21} \cdot \lambda \cdot \left[\beta + \frac{\alpha}{4} - \frac{\varepsilon}{2} \right] \cdot N_2 + \frac{1}{21} \cdot \lambda \cdot \left[\beta + \frac{\alpha}{4} - \frac{\varepsilon}{2} \right] \cdot Ar + (1 - \lambda) \cdot \left[\beta + \frac{\alpha}{4} - \frac{\varepsilon}{2} \right] \cdot O_2 \quad (2.1)$$

En la ecuación mostrada, se puede observar la relación entre la composición del combustible (cuyos valores están representados por las letras griegas α , β y ε) y los coeficientes de combustión, así como el factor lambda. Asimismo, se puede observar que la ecuación considera la presencia de oxígeno en el combustible.

En cuanto al factor lambda, este también debe ser calculado; ya que, a pesar de que el analizador de gases utilizado brinda un valor, este depende del ingreso de datos referentes a la composición del combustible y utiliza la ecuación de Brettschneider (Infrared Industries, 2018) para el cálculo. La ecuación propuesta por Kuranc (2015) en cambio, depende de los componentes volumétricos brindados por el analizador.

$$\lambda = \frac{c_{CO_2} + \frac{c_{CO}}{2} + c_{O_2} + \frac{c_{NO_x}}{2} + \left[\frac{\alpha}{4} \cdot \frac{3.5}{3.5 + \frac{c_{CO}}{c_{CO_2}}} - \frac{\varepsilon}{2} \right] \cdot (c_{CO_2} + c_{CO})}{\left[1 + \frac{\alpha}{4} - \frac{\varepsilon}{2} \right] \cdot (c_{CO_2} + c_{CO} + K1 \cdot c_{HC})} \quad (2.2)$$

donde,

λ : Factor lambda (-)

c_{CO_2} , c_{CO} , c_{NO_x} , c_{HC} : Componentes volumétricos de emisiones (%)

$K1$: Factor de conversión para el cálculo de HC, de FID (*Flame Ionization Detector*) a NDIR (*Non Dispersive Infrared*).

Para este trabajo se utilizó el valor de $K1=6$ de acuerdo a lo propuesto por el autor. Esto en vista de que la técnica de detección para el HC utilizada es la misma en los ensayos por Kuranc (2015) y Aliaga (2016).

El siguiente valor necesario para el análisis de la data es la relación aire-combustible (AFR) real. Para esto, sea requiere del cálculo del valor de AFR estequiométrico, que se obtiene a partir del balance la Ecuación (2.1) y del valor obtenido para Lambda (2.2). La fórmula utilizada es la siguiente (Heywood, 2018):

$$\lambda = \frac{AFR_{real}}{AFR_{estequimétrico}} \quad (2.3)$$

Es partir de los valores resultados de este análisis que se puede proceder al cálculo de flujos másicos de emisiones que, como se ha presentado en el capítulo anterior, es parte de la metodología de análisis de emisiones a través del VSP.

En el siguiente punto, se procede a presentar los conceptos asociados a la formación y comportamiento de cada una de las especies de emisiones a analizar.

2.2 EMISIONES

Las emisiones de gases contaminantes son el resultado de las reacciones que ocurren de los motores de combustión interna (MCI), durante las etapas de expansión y escape. Asimismo, y a pesar de que, el origen es en la cámara de combustión, se debe tener en cuenta que las reacciones químicas continúan durante el paso de los gases a través del tubo de escape; sin mencionar el post procesamiento a través de catalizadores. En cuanto a las especies en cuestión, en el punto anterior, se mostró la ecuación a partir de la cual se forman las emisiones y las especies principales tomadas en cuenta. Estas son el dióxido de carbono (CO_2), los óxidos de nitrógenos (NO_x), monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (HC) y material particulado que, de acuerdo a Ferguson & Kirkpatrick (2016), conforman aproximadamente el 50% de los contaminantes en la atmósfera.

A continuación, se presentará cada una de las especies mencionadas, sus procesos de formación, así como condiciones que las afectan y finalmente, que medidas de control existen.

2.2.1 ÓXIDOS DE NITRÓGENO

El primer grupo de especies son los óxidos de nitrógeno, los cuales se forman durante el proceso de combustión y, una vez liberados a la atmósfera reaccionan con el vapor de agua presente y la luz solar para formar ácido nítrico y ozono a nivel del suelo, los cuales son componentes la lluvia ácida y el smog (Ferguson & Kirkpatrick, 2016; Payri & Desantes, 2011). Esta familia de especies está formada por: el óxido nítrico (NO), dióxido de nitrógeno (NO_2) y óxido nitroso (N_2O) (Payri & Desantes, 2011). Existen otras especies, pero para efectos de la estimación de emisiones solo se utilizan las tres

mencionadas. A continuación, se muestra una comparación de las composiciones de especies.



En cuanto a la formación de los óxidos de nitrógeno, se trata de un proceso muy sensible a la temperatura que se da de forma paralela a la combustión. Sin embargo, su formación no tiene una relación directa con la combustión sino que, utiliza el ambiente creado a raíz de la misma (Heywood, 2018).

Cada especie tiene un mecanismo distinto de formación con las características mencionadas, y su estudio ha permitido la creación de estrategias de control. A continuación, se presentan los mecanismos de formación de las especies principales.

ÓXIDO NÍTRICO

Es la especie predominante entre los óxidos de nitrógeno y tiene como principal fuente la oxidación del nitrógeno atmosférico (Heywood, 2018). Se forma a partir de tres mecanismos distintos (Payri & Desantes, 2011) los cuales serán descritos a continuación.

× Mecanismo térmico:

Denominado mecanismo de Zeldovich extendido (Heywood, 2018), está formado por tres expresiones, dos propuestas por Zeldovich y la última propuesta por Lavoie. Se trata un mecanismo de reacción en cadena que se da debido a que la velocidad de reacción entre el oxígeno molecular y el nitrógeno molecular es muy lenta (Payri & Desantes, 2011).



Tiene muy alta dependencia con la temperatura, lo cual se evidencia por la energía de activación de la reacción que es de 319 kJ/mol. Sin embargo, y a pesar de esta dependencia, la velocidad de formación es menor que el proceso de combustión por lo que la formación se da en la post-llama en un ambiente generado por la combustión, como se ha mencionado (Heywood, 2018).

× Mecanismo súbito o de Fenimore:

Es el segundo mecanismo de formación y aborda la formación de NO en el frente de llama. Según Payri & Desantes (2011), estudios muestran que las concentraciones de esta especie son mucho mayores que lo predicho por el mecanismo anterior cuando la mezcla es rica. En el caso de las mezclas pobres, el mecanismo térmico es suficiente para predecir las emisiones de NO. Y, a diferencia del anterior, este mecanismo no depende enteramente de la temperatura (Heywood, 2018).

× Mecanismo debido al N₂O intermedio:

Se trata de un mecanismo de formación de NO a bajas temperaturas, que es importante considerar en motores de encendido por chispa debido a que, está ligado a las estrategias de reducción de NO_x, como la combustión premezclada pobre y el uso de la recirculación de gases de escape (EGR) (Payri & Desantes, 2011).

DIÓXIDO DE NITRÓGENO

Es la segunda especie que considerar, y tiene un mayor efecto en la formación de smog que el NO, motivo por el cual es importante considerar su formación; a pesar de que las cantidades en motores de encendido por chispa son menores, a diferencia de los motores de encendido por compresión (Heywood, 2018; Payri & Desantes, 2011).

Su formación está dada por la oxidación del NO cuando este se difunde o es transportado hacia zonas más ricas en HO. Se trata de una especie cuya formación está inversamente ligada a la temperatura (Heywood, 2018).

ÓXIDO NITROSO

Como se ha mencionado durante la formación de óxido nítrico, el N₂O es un compuesto en forma de gas que tiene una alta contribución al efecto invernadero (Payri & Desantes, 2011). Se trata de una especie intermedia cuya concentración está ligada a distintos factores como el uso de convertidores catalíticos, la relación aire/combustible y temperatura de combustión. Estos factores alteran la relación entre la formación de NO y N₂O.

Una vez conocidos las especies que conforman lo óxidos de nitrógeno presentes en las emisiones vehiculares, se puede observar que la concentración de estas depende de distintos factores, que pueden ser alterados para reducir la cantidad de NO_x resultante.

Dichos factores son: la relación aire/combustible, la fracción de gas quemado y el ángulo de encendido de la chispa (Heywood, 2018). Más adelante, se presenta el efecto de estos cambios y como se ven afectadas las diferentes especies en conjunto.

2.2.2 MONÓXIDO DE CARBONO

Es una especie cuya formación está ligada a la relación aire-combustible (Figura 2.1) (Ferguson & Kirkpatrick, 2016; Heywood, 2018; Payri & Desantes, 2011).

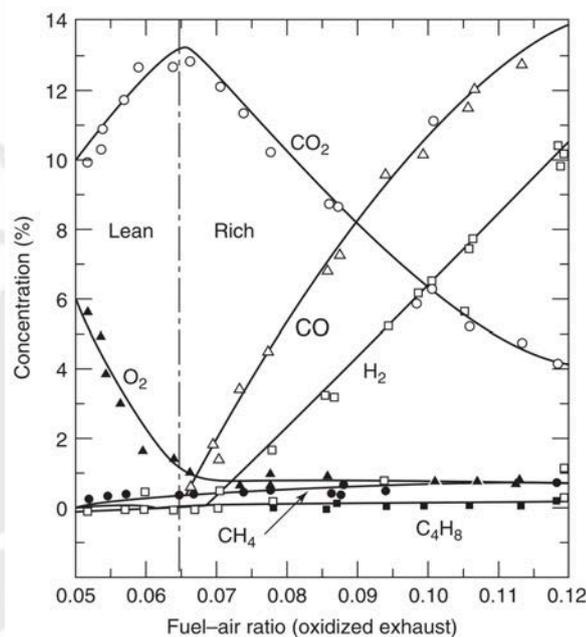


FIGURA 2.1: CONCENTRACIÓN DE CO VS. RELACIÓN COMBUSTIBLE/AIRE
FUENTE: FERGUSON & KIRKPATRICK (2016) ADAPTADO DE GERRISH & MEEM (1943)

En la figura se observa que, para mezclas pobres, la concentración de CO es muy baja y se mantiene constante hasta el punto en que la mezcla se vuelve estequiométrica, a partir del cual el valor se eleva de manera casi-lineal. Este es uno de los puntos a tomar en cuenta para la regulación de emisiones. Sin embargo, en la actualidad, los motores MECH a gasolina operan con mezclas cercanas a la estequiométrica (Heywood, 2018).

En cuanto al proceso de formación del CO, se puede diferenciar dos momentos: antes y después de la salida de los gases de la cámara de combustión. Esto se debe a que, hasta antes de la apertura de la válvula de escape el sistema C-O-H se encuentra en equilibrio (Ferguson & Kirkpatrick, 2016); y una vez se abre la válvula, la reacción de formación de CO se congela al bajar la temperatura de los gases (Ferguson & Kirkpatrick, 2016; Heywood, 2018; Payri & Desantes, 2011).

2.2.3 HIDROCARBUROS

Se trata de emisiones orgánicas que son el resultado del proceso incompleto de la combustión, se miden en ppm de átomos de carbono y se dividen en hidrocarburos con metano e hidrocarburos sin metano. Este último es un componente que presenta una alta reactividad para convertirse en *smog* (Heywood, 2018). Su formación está ligada a la composición del combustible y su concentración es más alta durante el inicio de funcionamiento del vehículo y el calentamiento del motor (Ferguson & Kirkpatrick, 2016); esto debido a que, durante esta etapa el motor funciona con una mezcla rica y, en caso de contar con catalizadores para control de emisiones (Ver sec. 2.3), estos aún no entran en funcionamiento y las emisiones pasan libremente (Heywood, 2018). Lo que quiere decir que, en esencia la concentración de hidrocarburos depende de la relación aire-combustible.

Existen diversas fuentes de hidrocarburos en un motor encendido por chispa: el sofocamiento de la chispa, hendiduras, absorción y liberación de aceite de motor, pobre calidad de combustión, depósitos en paredes del motor (Ferguson & Kirkpatrick, 2016). En la Figura 2.2 se muestran las distintas fuentes de hidrocarburos durante el ciclo de funcionamiento de un motor.

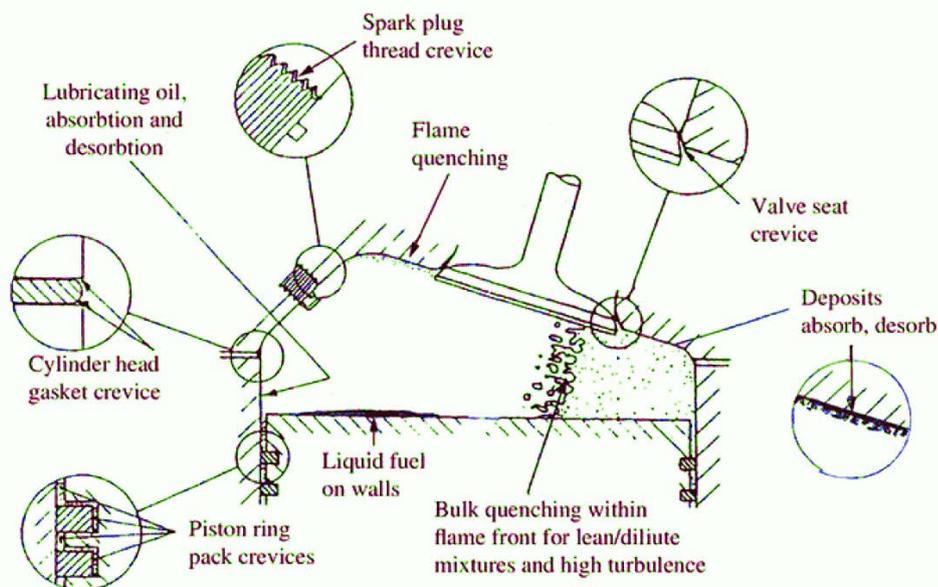


FIGURA 2.2: FORMACIÓN DE HC DURANTE PROCESO DE COMBUSTIÓN
FUENTE: HEYWOOD (2018)

Se puede observar que la formación de hidrocarburos se da a partir de la etapa de compresión con la absorción de hidrocarburos (HC) en las capas de aceite del motor y el ingreso de la premezcla en las grietas y espacios abiertos de la cámara de combustión. Es importante notar que, durante esta etapa, la temperatura de la cámara de combustión se eleva en conjunto con la presión, lo que facilita la absorción de HC en el aceite. Luego, durante la combustión, el frente de llama avanza y al acercarse a las paredes, que actúan como disipador de calor, se apaga sin haber llegado a la parte de la mezcla que se encuentra en las grietas (Heywood, 2018). Una vez iniciado el proceso de expansión, la presión baja y el gas atrapado en los resquicios sale e inicia su proceso de oxidación para formar CO. Finalmente, durante la fase de escape el HC en el aceite se libera y se inicia la salida de los gases de combustión, así como de una parte de los depósitos que se encuentran en las paredes de la cámara de combustión; sin embargo, la salida no es completa por lo que una parte queda dentro de la cámara y el ciclo vuelve a iniciar.

2.2.4 MATERIAL PARTICULADO Y OTRAS EMISIONES

En los motores de encendido por chispa hay tres clases de material particulado: partículas inorgánicas, las partículas orgánicas (incluyendo hollín) y sulfatos. En la actualidad, las emisiones de material particulado están compuestas principalmente por material orgánico condensado y hollín que es resultado de la combustión de mezcla rica. Pero, las cantidades en las que se presentan son menores que en los motores de encendido por combustión. (Heywood, 2018).

En caso de las emisiones de sulfato pueden ocurrir en sistemas con oxidación por catálisis implementada, esto debido a que el catalizador promueve la oxidación del SO_2 a SO_3 que es al combinarse con agua forma un aerosol de ácido sulfúrico.

El material particulado en cambio tiene como principal influencia la calidad de la gasolina y la relación aire/combustible, así como de la calidad de la combustión. Estas emisiones tienden a ser mayores al inicio de la operación del motor. (Heywood, 2018).

2.3 CONTROL DE EMISIONES

En la sección anterior se ha presentado las especies que se encuentran en los gases de escape, su formación y los factores que las afectan. Es a través de su estudio que en la

actualidad se han desarrollado medidas de control y reducción de dichas emisiones. Los principales componentes que se utilizan para reducir las emisiones se pueden agrupar en catalizadores (actúan en HC, CO y NO_x), reactores térmicos (HC y CO) y filtros para material particulado (Heywood, 2018). Además, a través del control del proceso de combustión (incrementando la turbulencia dentro del cilindro) y la recirculación de los gases de escape, se puede alterar las condiciones de formación de los gases de escape para poder encontrar un balance entre el funcionamiento adecuado del motor y el nivel de emisiones de los gases de escape (Ferguson & Kirkpatrick, 2016). A continuación, se presentan las medidas que se aplican en el control de emisiones y sus efectos.

CATALIZADORES

Una de las formas de control de las especies que forman las emisiones es a través de reacciones químicas que disocian los compuestos nocivos propiciando la formación de nuevos enlaces con otros compuestos (Ferguson & Kirkpatrick, 2016). Los catalizadores operan bajo dicho concepto y el material usado en la reacción depende de la especie particular a la que se vaya a tratar. En el caso de hidrocarburos y monóxido de carbono el proceso que se da es el de catálisis de oxidación en la que se busca oxidar el CO y HC en CO₂ (Heywood, 2018) .

Para poder cumplir el objetivo se requiere de una gran superficie a través de la que pasan los gases de escape, para ello se utilizan dos configuraciones distintas, la de panel de abeja y monolito las cuales se muestran en la Figura 2.3 y 2.4.

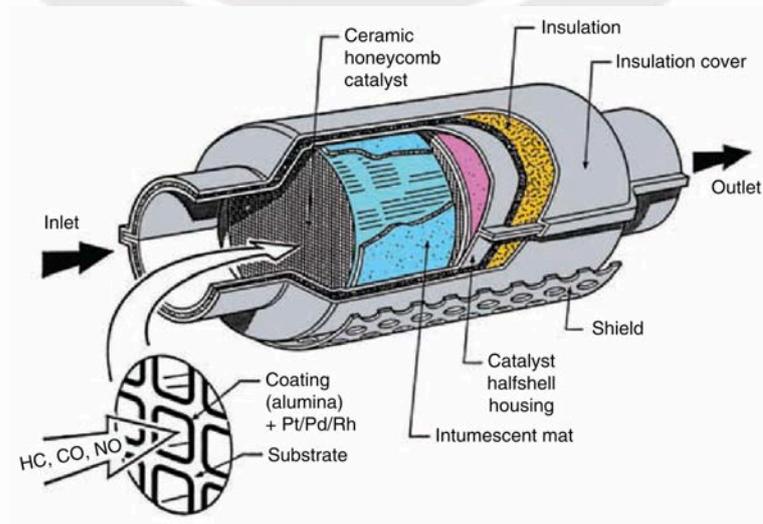


FIGURA 2.3: CATALIZADOR DE PANAL DE ABEJA
FUENTE: FERGUSON & KIRKPATRICK, (2016)

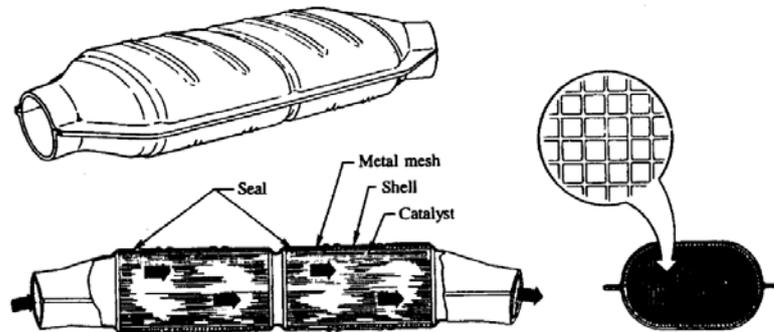


FIGURA 2.4: CATALIZADOR DE MONOLITO
FUENTE: HEYWOOD, (2018)

En el caso de los NO_x , los catalizadores actúan mediante un proceso de reducción que utiliza el CO , HC y H_2 presentes en los gases de escape. Al utilizar HC y CO para el proceso, el proceso general de tratamiento de gases de escape requiere de una segunda etapa de catálisis por oxidación presentada en el primer punto. Este método de control de emisiones requiere que el motor opere constantemente con una mezcla rica, lo que representa un gasto adicional de combustible. Pero, en caso de que el motor sea operado todo el tiempo con un ratio aire/combustible cercano al estequiométrico (con una variación de un 1% (Ferguson & Kirkpatrick, 2016)), el proceso de catálisis se puede dar en una sola etapa la cual se denomina catálisis de tres vías. Este actúa en conjunto con un lazo cerrado a través del que se regula el dosado para que el catalizador funcione de manera adecuada (Heywood, 2018).

REACTORES TÉRMICOS

Estos operan bajo el concepto de oxidación de HC y CO que, como se ha explicado en secciones previas, ocurre durante las fases de expansión y escape. El principio bajo el que este método de control opera es mediante la aceleración del proceso de oxidación. El cual, es mejorado a través de un colector ampliado que promueve la velocidad de la mezcla al mismo tiempo que mantiene la temperatura de la reacción (Heywood, 2018).

RECIRCULACIÓN DE GASES DE ESCAPE Y RETARDO DE ENCENDIDO DE LA CHISPA

Esa medida implica, como su nombre lo dice, el reingreso de gases de escape a la cámara de combustión, así como la calibración del ángulo de encendido de la chispa. Por lo que, está directamente ligada a la relación aire-combustible y la composición de la premezcla dentro de la cámara de combustión.

La principal especie afectada por este método de control son los NO_x ; los cuales, como se ha explicado en la sección correspondiente, tienen una concentración fuertemente relacionada con la temperatura de combustión. Luego, dicha temperatura es a su vez influenciada por el ratio aire-combustible y el ángulo de encendido de la chispa (Ferguson & Kirkpatrick, 2016). En el caso de HC y CO, estos dependen de la calidad de la combustión. En la Figura 2.5, se puede observar la variación de emisiones en relación con el ratio aire-combustible.

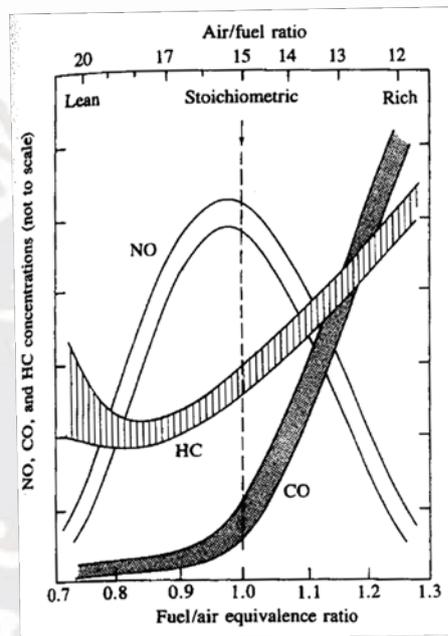


FIGURA 2.5: VARIACIÓN DE EMISIONES RESPECTO A LA RELACIÓN COMBUSTIBLE/AIRE
FUENTE: HEYWOOD (2018)

Como se puede observar en la figura, en el caso del NO_x , su concentración es más alta cuando la mezcla es cercana a estequiométrica y su distribución es parabólica. Por lo que mover la relación hacia un lado u otro del punto de estequiometría reduciría su valor. En el caso de las emisiones de CO, estas se encuentran en sus valores cercanos al mínimo cuando la mezcla es pobre pero cuando el NO_x llega a su punto más alto y la mezcla se vuelve rica, las emisiones de CO comienzan a subir de forma radical. Un comportamiento similar se puede observar en los HC, cuyo punto más bajo se encuentra cuando la mezcla es pobre y tiene forma parabólica. Para llegar a este punto en que se reducen las emisiones de todos los gases involucrados se realiza una recirculación de gases de escape; sin embargo, hace que la calidad de combustión disminuya por lo que, hay que tener en cuenta hasta que punto se puede incrementar la cantidad de gases en recirculación (Heywood, 2018).

2.4 PARÁMETROS DE CARACTERIZACIÓN

Para poder realizar una caracterización de las emisiones y poder relacionarlas con el consumo de combustible se usan índices de emisión. Típicamente el índice de emisión es la relación entre la masa de dicha especie entre la masa de combustible quemado (Ecuación (2.4)).

$$EI_i = \frac{\dot{m}_i}{\dot{m}_f} \quad (2.4)$$

donde,

EI_i : Indicador de emisiones (-)

\dot{m}_i : Flujo másico de especie (g/s)

\dot{m}_f : Flujo másico de combustible (g/s)

Sin embargo, y de acuerdo a las necesidades de las distintas tecnologías, las emisiones pueden ser expresadas de diferente manera como por ejemplo en función de la potencia efectiva, la cantidad de energía liberada por el combustible o, en el caso de vehículos livianos, en función de la distancia recorrida (Payri & Desantes, 2011). A continuación, la ecuación a utilizar.

$$\dot{m}_{i.km} = \frac{\dot{m}_i \cdot 1000}{v} \quad (2.5)$$

donde,

$\dot{m}_{i.km}$: Flujo por kilómetro recorrido (g/km)

\dot{m}_i : Flujo másico de especie (g/s)

v : Velocidad del vehículo (m/s)

2.5 POTENCIA ESPECÍFICA VEHICULAR

Para concluir el capítulo, se presentará la definición del VSP; el cual, es un parámetro de análisis de emisiones propuesto por Jiménez-Palacios, (1999) que permite realizar estandarizar data de distintos vehículos para poder realizar un análisis global de la data recolectada. Jiménez-Palacios (1999) la define como “el ratio entre potencia instantánea del vehículo en relación con la masa”. A continuación, se presenta la fórmula que se va a utilizar para realizar el cálculo del VSP.

$$VSP = v \cdot (a \cdot (1 + \varepsilon_i) + g \cdot (\text{grade} + C_R)) + \frac{1}{2} \rho_a \frac{C_D \cdot A}{m} (v + v_w)^2 \cdot v \quad (2.6)$$

donde,

v : Velocidad (m/s)

a : Aceleración (m/s²)

ε_i : “Factor de masa”, equivalente a la masa traslacional de los componentes giratorios de transmisión (ruedas, engranajes, ejes, etc.).

g : Aceleración de la gravedad (9.8 m/s²)

C_R : Coeficiente de resistencia a la rodadura

ρ_a : Densidad del aire a temperatura ambiente (de acuerdo a condiciones climáticas)

C_D : Coeficiente de arrastre

A : Área frontal del vehículo

m : Masa del vehículo

v_w : Velocidad del viento en contra del vehículo

Los datos de velocidad y aceleración pueden ser obtenidos a través de la data de GPS recopilada durante pruebas experimentales. El factor de masa depende del cambio en el que se encuentre el vehículo y sus valores se encuentran son de 0.25 en 1^{ra}, 0.15 en 2^{da}, 0.010 en 3^{ra} y 0.075 en 4^{ta} para vehículos con transmisiones mecánicas. En cuanto al coeficiente de resistencia a la rodadura, este depende de la superficie, el tipo de llanta y la presión de la misma, usualmente de consideran valores entre 0.0085 y 0.016 (Jiménez-Palacios, 1999). Dentro de la fórmula mostrada, se pueden distinguir tres factores distintos los cuales se denominarán: factor de aceleración, factor de resistencia a la rodadura y factor de arrastre aerodinámico. A continuación, se presenta la fórmula dividida en cada uno de los factores.

$$\text{Factor de aceleración:} \quad v \cdot (a \cdot (1 + \varepsilon_i)) \quad (2.7)$$

$$\text{Factor de resistencia de rodadura:} \quad v \cdot g \cdot (\text{grade} + C_R) \quad (2.8)$$

$$\text{Factor de arrastre aerodinámico:} \quad \frac{1}{2} \rho_a \frac{C_D \cdot A}{m} (v + v_w)^2 \cdot v \quad (2.9)$$

Se puede observar que la velocidad del vehículo está presente en todos los factores, por lo que, al momento de realizar el análisis, se toma en cuenta los otros valores para poder determinar la influencia de cada uno en el comportamiento del VSP.



Capítulo 3:

Procesamiento de data

En este capítulo, se presenta el procesamiento de la data obtenida para poder realizar el análisis de la relación entre el VSP y las emisiones vehiculares. Asimismo, se presenta el cálculo inicial del VSP y un breve análisis de su comportamiento. La data utilizada para en este trabajo de tesis fue obtenida a partir del estudio realizado por Aliaga (2016), en una camioneta Nissan Santa Fe del año 2010 (ver Anexo 1). Como resultado de este capítulo, se obtendrán los siguientes valores: flujos máscicos de las especies de emisiones, el VSP y los indicadores de emisiones utilizados en el control legislativo actual. El motivo de la utilización del flujo máscico, en lugar de la concentración se debe a que es dicho flujo el que tiene un impacto directo en la calidad del aire.

Para obtener los valores necesarios se siguió dos procedimientos: el análisis de la combustión, y el cálculo del VSP, ambos presentados en el capítulo anterior.

La estructura del capítulo es la siguiente. En primer lugar, se presentan los datos obtenidos. En segundo lugar, se presenta el análisis de la combustión, a partir del cual se procede a calcular los flujos máscicos correspondientes a las especies de interés. Finalmente, se presenta el modelo de cálculo de la Potencia Específica Vehicular.

Para presentar la metodología de análisis, se ha seleccionado al azar los ensayos PVC04 (a velocidad constante) y PCT03 (en condiciones de tránsito).

3.1 PRESENTACIÓN DE DATOS

En primer lugar, se muestra las variables obtenidas como resultado del experimento; las cuales, servirán como punto de partida para la realización de cálculos.

TABLA 3.1: DATOS INICIALES

Variable	Unidades	Variable	Unidades
Fecha	dd/mm/aaaa	NO _x	ppm
Hora	mm:ss	Humedad relativa	%
Señal de MAF	V	Temperatura	°C
HC	ppm	Inclinación	grados
CO	%	Velocidad	km/h
CO ₂	%	Coordenadas	-
O ₂	%	Flujo de aire seco	g/s

Asimismo, se presenta la codificación de los ensayos realizados por Aliaga (2016) y las características de cada uno. La experiencia constó 12 ensayos, 4 a velocidad constante y 8 en condiciones de tráfico. (Tabla 3.2 y Tabla 3.3).

TABLA 3.2: PRUEBAS A VELOCIDAD CONSTANTE

Código	PVC01	PVC02	PVC03	PVC04
% de etanol	7.8	7.8	10	10

TABLA 3.3: PRUEBAS EN CONDICIONES DE TRÁFICO

Código	PCT01	PCT02	PCT03	PCT04	PCT05	PCT06	PCT07	PCT08
% de etanol	7.8	7.8	7.8	7.8	10	10	10	10

Los ensayos a velocidad constante se realizaron en la Av. Ramiro Prialé y cada ensayo tuvo una duración de nueve a diez minutos aproximadamente; mientras que, los ensayos en condiciones de tráfico se realizaron en una ruta establecida (ver Anexo 1) y cada uno tuvo una duración aproximada de una hora y treinta minutos.

3.2 ANÁLISIS DEL PROCESO DE COMBUSTIÓN

Entonces, de acuerdo a lo mencionado al inicio del capítulo, el primer paso a seguir es el análisis del proceso de combustión a partir del cual, se obtendrán los valores de lambda y la relación aire/combustible. Datos que serán utilizados luego, para la obtención de los flujos máxicos del aire y las emisiones de contaminantes.

Para esto, se realizó el balance de la ecuación (2.1) presentada en el capítulo anterior. En cuanto a la composición de la gasolina en el Perú, se utilizó el valor propuesto por Heywood, (2018); dado que, en la literatura no se ha encontrado un valor establecido. Entonces, las expresiones correspondientes a $C_\beta H_\alpha O_\epsilon$ para cada una de las composiciones de combustible utilizadas en los ensayos son las siguientes.

$$\text{Gasohol E7.8 (Gasolina 92\% - Etanol 7.8\%, v/v): } 0.922C_{8.26}H_{15.5} + 0.078C_2H_5OH$$

$$\text{Gasohol E10 (Gasolina 90\% - Etanol 10\%, v/v): } 0.9C_{8.26}H_{15.5} + 0.1C_2H_5OH$$

A partir de esto se realizó el balance de la ecuación (2.1) y el cálculo de la relación aire combustible estequiométrica.

$$C_\beta H_\alpha O_\epsilon + \lambda \cdot \left[\beta + \frac{\alpha}{4} - \frac{\epsilon}{2} \right] \cdot O_2 + \frac{78}{21} \cdot \lambda \cdot \left[\beta + \frac{\alpha}{4} - \frac{\epsilon}{2} \right] \cdot N_2 + \frac{1}{21} \cdot \lambda \cdot \left[\beta + \frac{\alpha}{4} - \frac{\epsilon}{2} \right] \cdot Ar \rightarrow$$

$$\beta \cdot CO_2 + \frac{\alpha}{2} H_2O + \frac{78}{21} \cdot \lambda \cdot \left[\beta + \frac{\alpha}{4} - \frac{\epsilon}{2} \right] \cdot N_2 + \frac{1}{21} \cdot \lambda \cdot \left[\beta + \frac{\alpha}{4} - \frac{\epsilon}{2} \right] \cdot Ar + (1 - \lambda) \cdot \left[\beta + \frac{\alpha}{4} - \frac{\epsilon}{2} \right] \cdot O_2$$

Luego, utilizando la ecuación (2.2) se obtuvo los valores del factor lambda.

$$\lambda = \frac{c_{CO_2} + \frac{c_{CO}}{2} + c_{O_2} + \frac{c_{NO_x}}{2} + \left[\frac{\alpha}{4} \cdot \frac{3.5}{3.5 + \frac{c_{CO}}{c_{CO_2}}} - \frac{\epsilon}{2} \right] \cdot (c_{CO_2} + c_{CO})}{\left[1 + \frac{\alpha}{4} - \frac{\epsilon}{2} \right] \cdot (c_{CO_2} + c_{CO} + K1 \cdot c_{HC})}$$

Dichos resultados fueron comparados con valores teóricos como punto de control en el proceso de análisis. Sin embargo, se debe tener en cuenta que el combustible utilizado contiene etanol; por lo que, se espera que exista una diferencia. Los resultados se presentan en las figuras Figura 3.1 y Figura 3.2 a continuación.

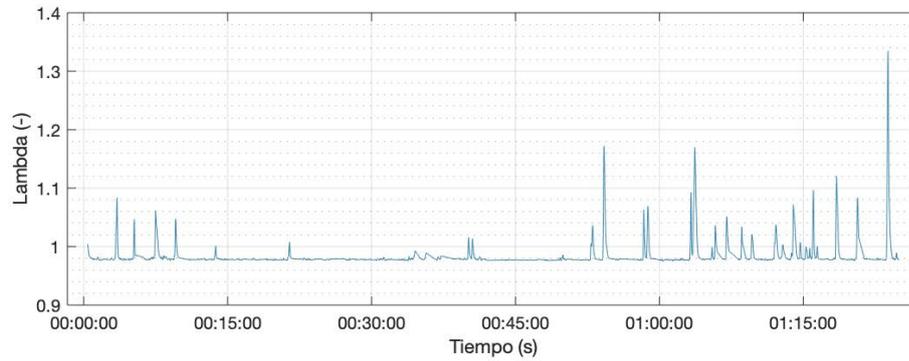


FIGURA 3.1: VARIACIÓN DE LAMBDA EN EL TIEMPO PARA EL ENSAYO PCT03

La Figura 3.1 corresponde a la variación de Lambda en el tiempo, y en ella se puede observar que los valores de Lambda obtenidos se encuentran entre 0.97 y 1.33. Los cuales se encuentran dentro del rango teórico. En la Figura 3.2 se presenta la variación en el caso de la mezcla gasohol comercial, es decir, E7.8.

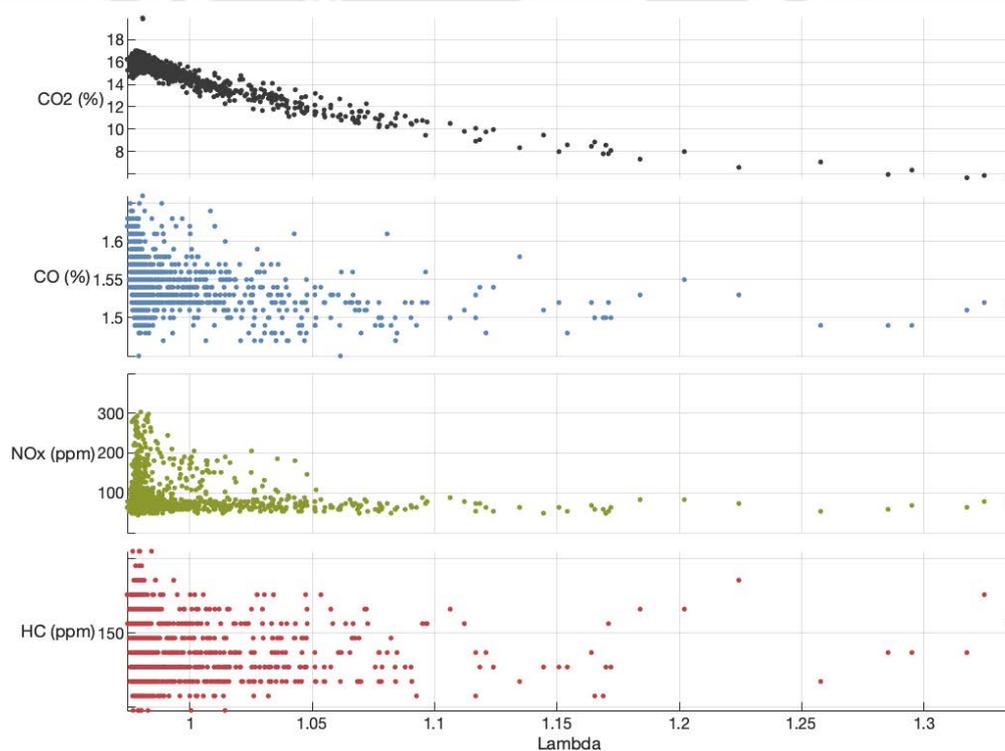


FIGURA 3.2: VARIACIÓN DE CONCENTRACIÓN DE EMISIONES VS LAMBDA PARA EL ENSAYO PCT03

En la Figura 3.2 se puede observar que las únicas especies que el CO_2 y el CO presentan una tendencia en relación con distintos valores de lambda, mientras que y HC y el NO_x , tienen valores similares a lo largo del rango de valores de lambda. Esto se puede deber a la presencia de catalizadores.

Entonces, una vez calculados los valores del factor lambda real y la relación aire-combustible estequiométrica, se puede obtener la relación aire-combustible real (AFR), cuyo valor se necesita para obtener los valores de los flujos máscicos de emisiones. El ARF real se calculará utilizando la siguiente ecuación.

$$\dot{m}_i = \dot{m}_{aire} \cdot \left(1 + \frac{1}{\lambda + AFR}\right) \cdot \frac{c_i \cdot \mu_i}{\sum_{j=n}^{j=1} c_j \cdot \mu_j} \quad (3.1)$$

donde,

\dot{m}_i : Flujo máscico de especie contaminante (g/s)

\dot{m}_{aire} : Flujo máscico de aire húmedo (g/s)

c_i : porcentaje volumétrico de componente (-)

μ_i : Masa molar de componente (g/mol)

Los datos correspondientes a las masas molares de los componentes se presentan a continuación.

TABLA 3.4: MASA MOLAR DE COMPONENTES DE EMISIONES
FUENTE: CIAAW, (2017)

Especie	CO ₂	CO	NO _x	HC	H ₂ O	N ₂	O ₂
Masa Molar	44.009	28.01	38.006	86.202	18.015	28.013	31.999

Una vez aplicada la fórmula, se obtiene el flujo máscico de cada una de las especies involucradas. Asimismo, se puede observar su relación con la concentración de los gases de escape. Para esto, se realizó la gráfica en la Figura 3.3.

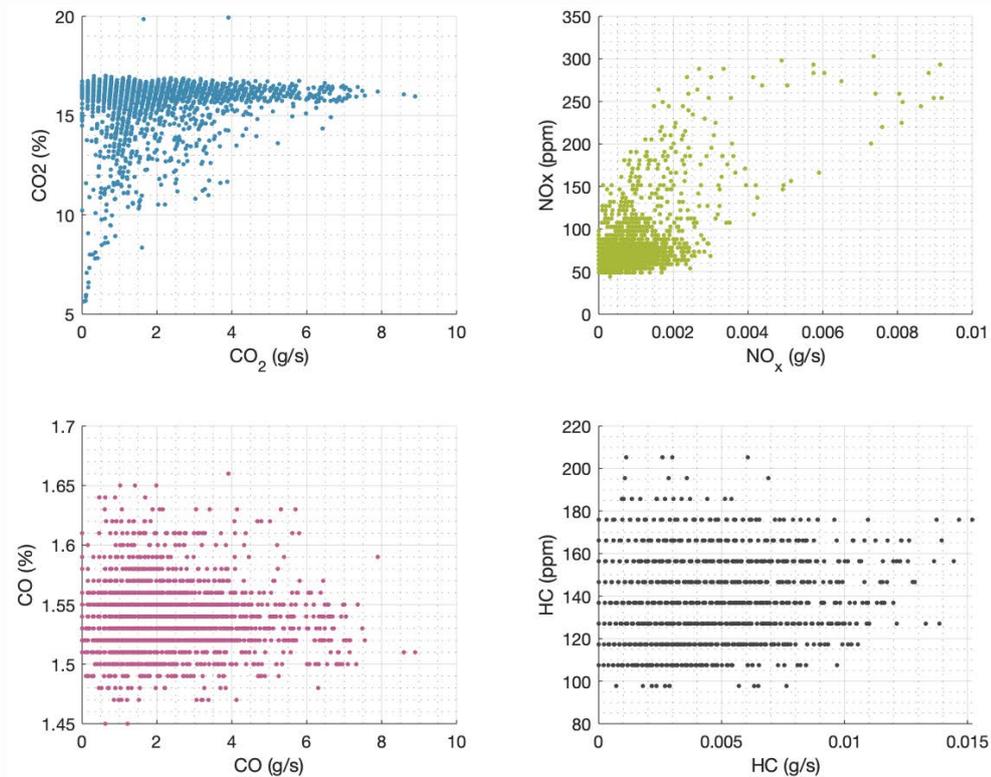


FIGURA 3.3: RELACIÓN ENTRE CONCENTRACIÓN Y FLUJO MÁSICO PARA PCT3E7.8

En la Figura 3.3 se observa que en el caso del CO y HC no existe una relación directa entre la concentración y el flujo, a diferencia del NO_x. El CO₂ en cambio, muestra que para flujos bajos no hay una relación establecida pero conforme el flujo másico aumenta el rango de concentración de las emisiones se vuelve más pequeño.

Luego, se analizó la relación entre los flujos másicos y la velocidad. Para esto, se realizó una gráfica comparativa de la variación de ambos parámetros en el tiempo (ver Figura 3.4). Para ilustrar los resultados obtenidos, se seleccionó el ensayo PVC04; debido a que, se trata de un ensayo a velocidad cuasi constante, lo que hace que, la diferencia entre la velocidad y el flujo sea más evidente.

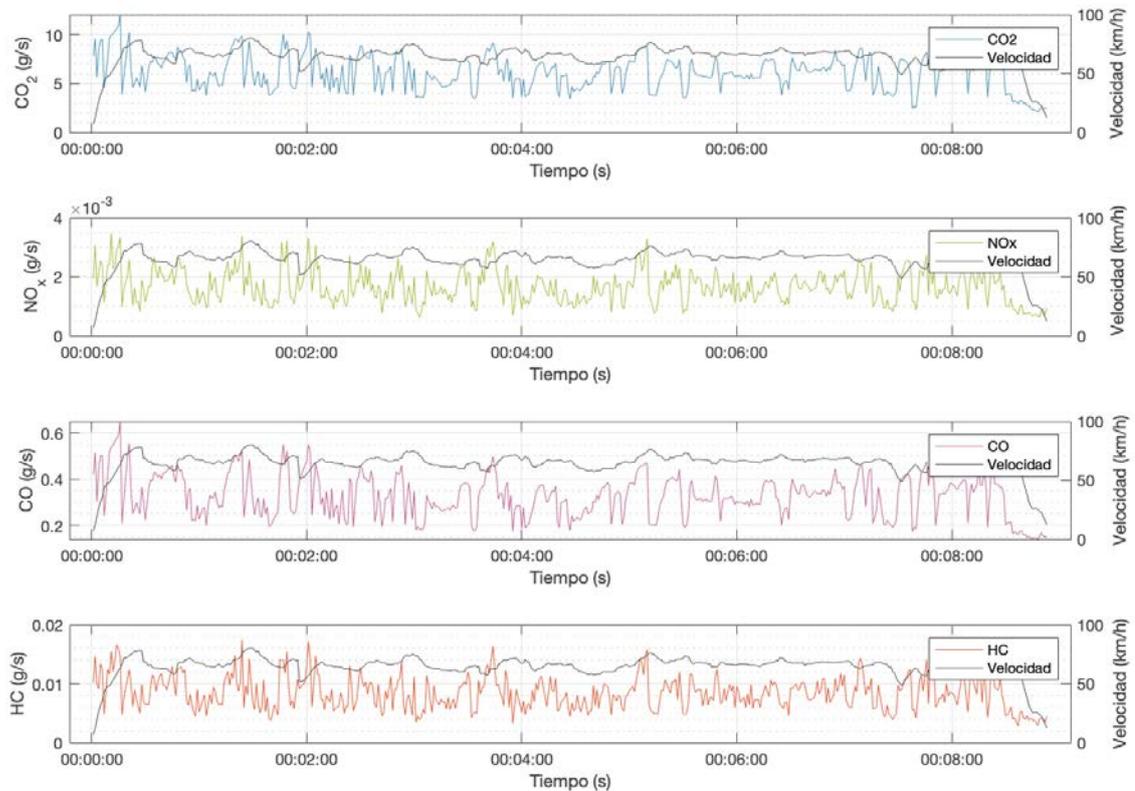


FIGURA 3.4: COMPARACIÓN ENTRE VSP, VELOCIDAD DEL VEHÍCULO VS. TIEMPO PARA DIFERENTES COMPUESTOS MEDIDOS DURANTE EN ENSAYO PVC4E10

En la Figura 3.4 se puede observar que no existe una relación directa entre la velocidad y el flujo másico de las emisiones a pesar de tratarse de un ensayo a velocidad constante. Esto es consistente con los resultados obtenidos por Jiménez-Palacios (1999) cuando propuso el parámetro VSP y Rodríguez et al. (2016) en las pruebas efectuadas en Bogotá.

3.3 POTENCIA ESPECÍFICA VEHICULAR

Una vez calculados los flujos másicos de cada una de las especies y, en vista de lo mencionado en el punto anterior, se procede a realizar el cálculo del VSP, cuya fórmula fue presentada en el capítulo dos (ecuación (2.6)), pero para efectos de practicidad, se muestra a continuación.

$$VSP = v \cdot (a \cdot (1 + \varepsilon_i) + g \cdot (grade + C_R)) + \frac{1}{2} \rho_a \frac{C_D \cdot A}{m} (v + v_w)^2 \cdot v$$

La Tabla 3.5, muestra los valores utilizados para cada una de las variables. Se incluyen valores asociados al vehículo, así como valores calculados a partir de los datos obtenidos.

TABLA 3.5: VALORES UTILIZADOS EN EL CÁLCULO DEL VSP

Variable	Valor utilizado
Aceleración (\mathbf{a})	Cálculo realizado a partir de datos obtenidos.
Factor de Masa ($\mathbf{\epsilon}_i$)	0.25, 0.20, 0.15, 0.1 de acuerdo al cambio que se asumió a 10, 30, 40 y 50 km/h (Latam Autos, 2017)
Aceleración de la gravedad (\mathbf{g})	9.81 m/s ²
Coefficiente de rodadura (\mathbf{C}_R)	0.0135 (Jiménez-Palacios, 1999)
Densidad del aire ($\mathbf{\rho}_a$)	Cálculo a partir de data de temperatura y humedad recopilada en el ensayo
Coefficiente de arrastre (\mathbf{C}_D)	0.38 (Automobile Catalog, 2010)
Área (\mathbf{A})	1.89 m x 1.76 m (especificaciones del vehículo)
Masa del vehículo (\mathbf{m})	1930 kg (especificaciones de vehículo + peso agregado)
Velocidad del viento (\mathbf{v}_w)	1 m/s (INEI, 2012)

Los valores obtenidos se graficaron de dos formas. En primer lugar, se muestra la variación del VSP en el tiempo para cada ensayo (ver grafica superior de Figura 3.5 para el ensayo PVC04). Lo cual permitió observar los valores obtenidos, e identificar la existencia de valores atípicos. Como consecuencia de esto, se realizó la gráfica inferior en la que se puede observar un desglose de los tres componentes principales del VSP (aceleración, arrastre aerodinámico y coeficiente de rodadura).

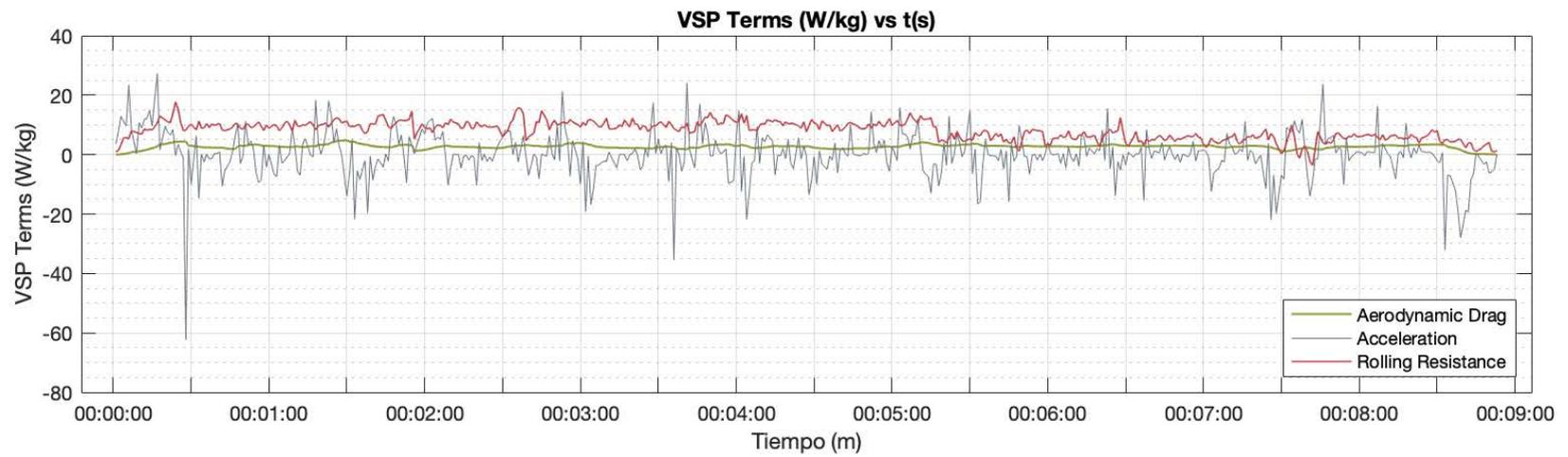
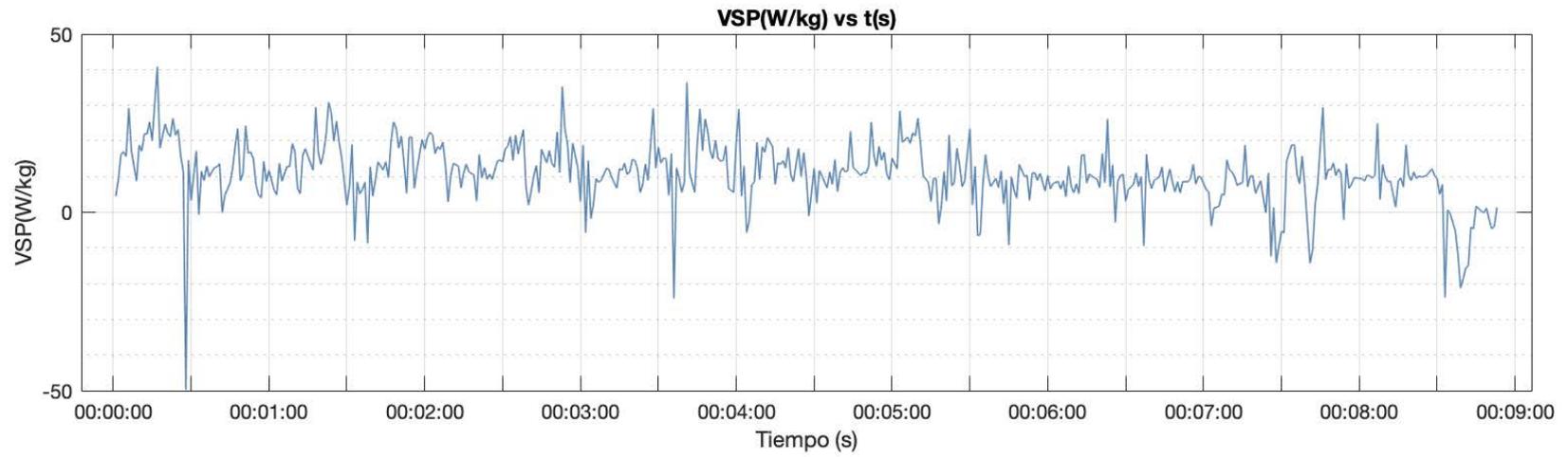


FIGURA 3.5: DISTRIBUCIÓN DEL VSP EN EL TIEMPO Y DESGLOSE DE FACTORES PARA PRUEBA PVC04

Entonces, al comparar ambas gráficas, se puede observar que el mayor contribuyente al valor final del VSP es el factor de aceleración, el cual está compuesto por la velocidad, aceleración y el factor de masa. Sin embargo, como se mencionó en el Capítulo 2:, la velocidad es un componente transversal a los tres factores y el factor de masa está asociado directamente a la velocidad del vehículo; por lo que, es la aceleración del vehículo la variable directamente responsable por los valores globales del Factor Aceleración del VSP.

Asimismo, como se ha mencionado previamente, en la Figura 3.5 existen datos atípicos, que son valores claramente mayores, o menores en comparación con los demás. Por lo que, se debe determinar si se trata de valores atípicos desde un punto de vista estadístico. Este estudio se realizará en el factor aceleración en vista de que es el que mayor impacto tiene en el valor final del VSP. Para esto, se graficó la relación entre el VSP y los componentes de dicho factor (velocidad y aceleración) (ver Figura 3.6.).

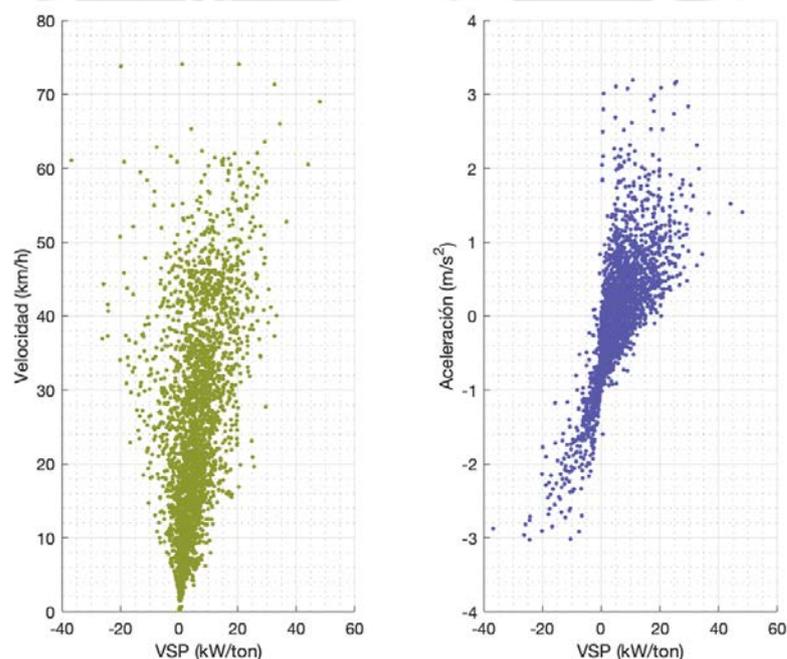


FIGURA 3.6: VARIACIÓN DE VELOCIDAD Y ACELERACIÓN RESPECTO AL VSP PARA PRUEBAS PCT03

Se puede observar que en ambos casos existe una relación cuasi-lineal, cuyos valores se agrupan conforme el VSP se acerca a cero. Este comportamiento es específicamente pronunciado en el caso de la velocidad donde existe una mayor dispersión de puntos; lo cual, puede ser uno de los factores que hacen que esta por sí sola no sea un buen predictor del comportamiento de emisiones vehiculares. En el caso de la aceleración, sin embargo,

se observa una asociación positiva con dos comportamientos distintos. Cuando el valor del VSP es mayor a cero se observa una mayor dispersión en la parte superior de la gráfica. Por el contrario, cuando los valores del VSP son menores a cero la dispersión es menor conforme los valores se vuelven menores.

Es entonces, a partir de la comparación entre ambos parámetros que, se reafirma la propuesta del análisis de la aceleración del vehículo para la determinación de valores atípicos. Para ello, se observó dichos valores de aceleración, y otras variables relacionadas como localización e inclinación; y, se determinó que estos no pueden ser explicados por una desaceleración del vehículo en condiciones normales. Por ejemplo, si se observan otros valores como los grados de inclinación en la data, en la mayoría de los casos atípicos, se ha encontrado una medida mucho mayor a la permitida en una vía de tránsito ($>10^\circ$). Esa variación en puntos contiguos lleva a la hipótesis que en dichos puntos el zarandeo del sistema de GPS en el interior del vehículo pudo haber alterado las mediciones.

En cuanto a la metodología utilizada para tratar los puntos identificados como atípicos, se utilizó una combinación del análisis estadístico propuesto por Seo (2006) con la utilización de la herramienta para limpieza de curvas de Matlab. En primer lugar, se realizó el cálculo de los valores representativos con ayuda del histograma de distribución de la aceleración para cada uno de los ensayos. A partir de este cálculo, y según lo mencionado por Seo (2006), se determinó que el método de cuartiles (que puede visualizarse mediante un diagrama de cajas) es el más adecuado. Una vez establecidos los valores límites, se procedió a utilizar la herramienta *pchip*¹ de interpolación cúbica de Matlab para reemplazar los valores atípicos sin perder la forma de la curva.

Sin embargo, los valores identificados como atípicos de acuerdo el diagrama de cajas, representa un porcentaje considerable de datos; por lo que finalmente, se decidió ampliar el rango de valores y utilizar los percentiles 0.025% y 99.75% como puntos de corte y así preservar una mayor cantidad de data original. Además de la disminución de errores por interpolación.

¹ La selección de este método de interpolación en lugar de la simple eliminación o la interpolación lineal se dio a través de ensayos de prueba – error para distintos sets de data; en los cuales, se probó los efectos de los distintos métodos de interpolación disponibles en la curva y el número de valores atípicos resultantes.

En la Figura 3.7 se puede observar un ejemplo de la selección de puntos a eliminar durante el cálculo de la aceleración para en ensayo PCT3E7.8; mientras que, en la Tabla 3.6 se presenta la relación entre los valores atípicos para cada set de data, y el número total de puntos.

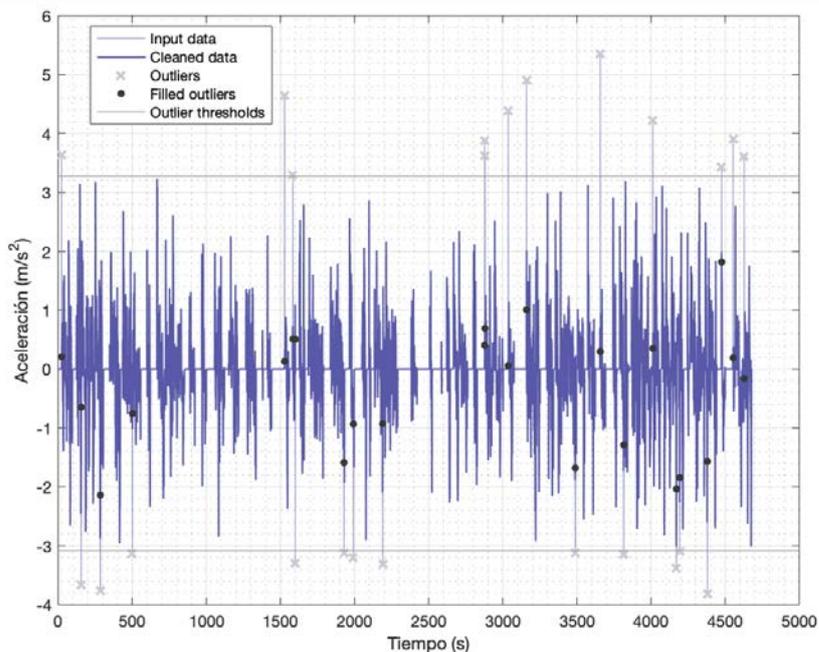


FIGURA 3.7: ELIMINACIÓN DE DATOS ATÍPICOS EN ACELERACIÓN PARA EL ENSAYO PCT3E7.8

Se puede observar en la Tabla 3.6 que, para todos los ensayos, la cantidad de valores considerados atípicos no excede el 1% del total.

TABLA 3.6: RELACIÓN ENTRE OUTLIERS Y PUNTOS PARA ENSAYOS EN CONDICIONES DE TRÁNSITO

Ensayo	Nº Outliers	Nº Puntos	%
PCT1E7.8	22	4347	0.51%
PCT2E7.8	24	4853	0.49%
PCT3E7.8	24	4682	0.51%
PCT4E7.8	20	4066	0.49%
PCT5E10	22	4591	0.48%
PCT6E10	24	4856	0.49%
PCT7E10	22	4501	0.49%
PCT8E10	20	3971	0.50%

TABLA 3.7: RELACIÓN ENTRE OUTLIERS Y PUNTOS PARA ENSAYOS A VELOCIDAD CONSTANTE (CONTINUACIÓN)

Ensayo	Nº Outliers	Nº Puntos	%
PVC1E7.8	2	565	0.35%
PVC2E7.8	2	522	0.38%
PVC3E10	2	513	0.39%
PVC4E10	2	494	0.40%

Dichos valores fueron reemplazados en la curva utilizando la herramienta *pchip* de Matlab, que es una interpolación cúbica que preserva la forma de la curva (Mathworks, 2019).

Una vez los puntos se han sido reemplazados, se obtiene una gráfica del VSP que permite hacer una mejor comparación respecto al flujo de emisiones (Figura 3.8). Para ilustrar dichos resultados, y poder hacer una comparación con lo presentado en el punto anterior (ver Figura 3.4.), se muestran los resultados correspondientes al ensayo PVC04.

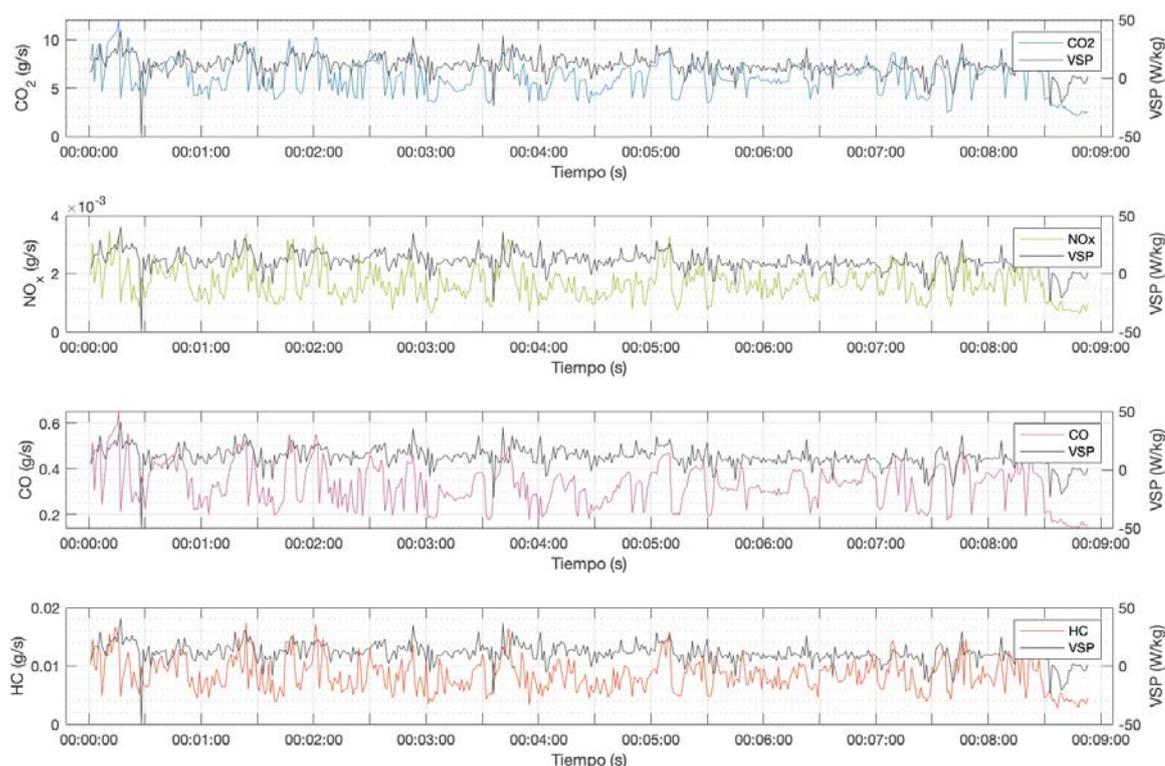


FIGURA 3.8: FLUJO DE EMISIONES (g/s) VS. TIEMPO (s) PARA ENSAYO PVC04

La Figura 3.8 confirma lo mencionado en el punto anterior respecto a la relación entre el VSP y el flujo de emisiones. Se puede observar mayor asociación entre los valores a pesar de tratarse de un ensayo a velocidad constante. Sin embargo, para ilustrar mejor la diferencia entre los tres parámetros en cuestión (velocidad, aceleración y VSP) se presentan las figuras Figura 3.9, Figura 3.10, Figura 3.11 y Figura 3.12. En ellas se observa la comparación de dichos parámetros con el flujo másico de las emisiones.

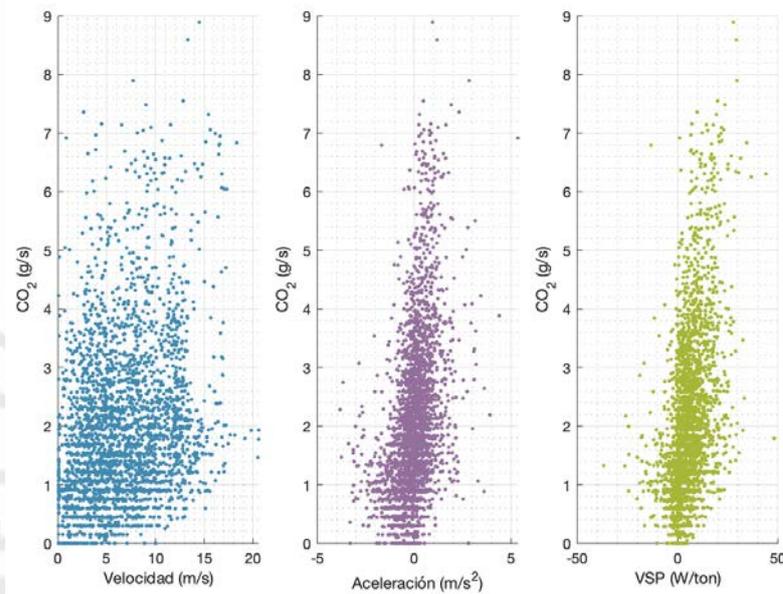


FIGURA 3.9: COMPORTAMIENTO DE CO₂ EN RELACIÓN A PARÁMETROS LOS CINEMÁTICOS DE VELOCIDAD, ACCELERACIÓN Y VSP PARA ENSAYO PCT03

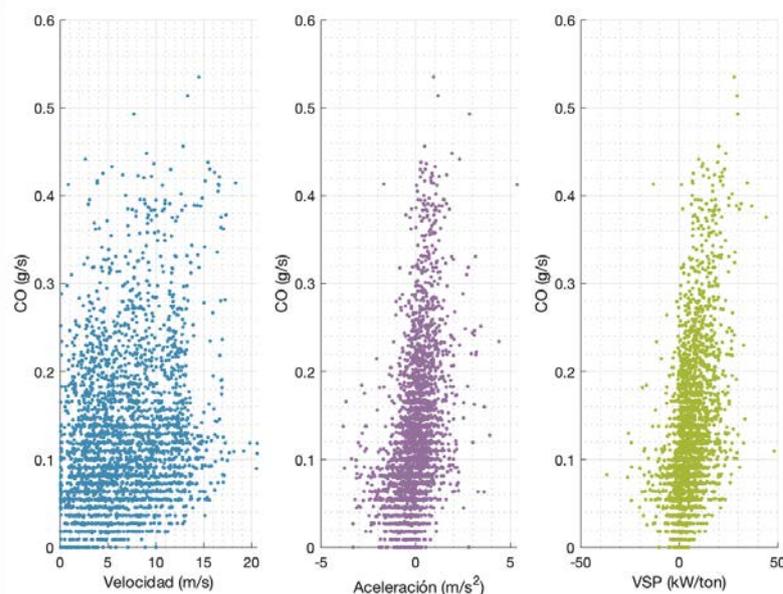


FIGURA 3.10: COMPORTAMIENTO DEL CO EN RELACIÓN A PARÁMETROS LOS CINEMÁTICOS DE VELOCIDAD, ACCELERACIÓN Y VSP PARA ENSAYO PCT03

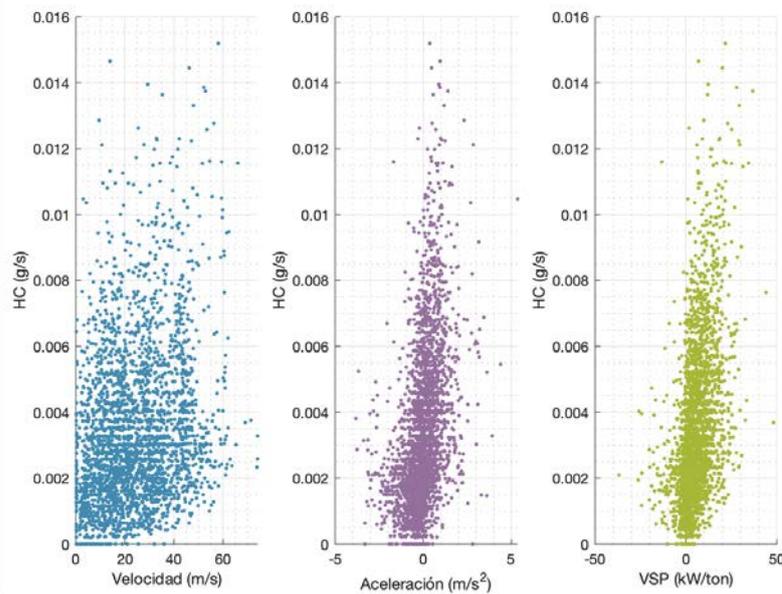


FIGURA 3.11: COMPORTAMIENTO DE HC EN RELACIÓN A PARÁMETROS LOS CINEMÁTICOS DE VELOCIDAD, ACCELERACIÓN Y VSP PARA ENSAYO PCT03

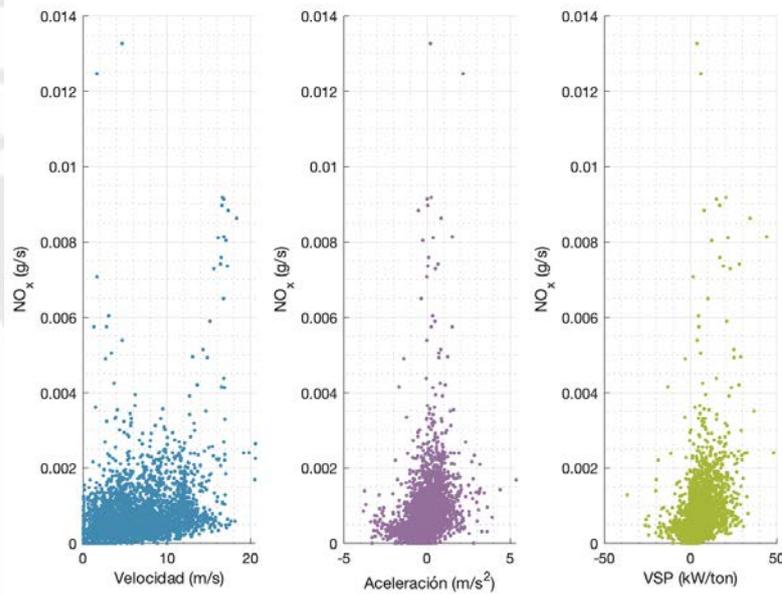


FIGURA 3.12: COMPORTAMIENTO DEL NO_x EN RELACIÓN A PARÁMETROS LOS CINEMÁTICOS DE VELOCIDAD, ACCELERACIÓN Y VSP PARA ENSAYO PCT03

En las cuatro figuras se puede observar que la relación entre la velocidad y el flujo másico de las emisiones no presenta un patrón a partir del cual se pueda establecer una relación entre las variables. En el caso de la aceleración y el VSP, se observa una forma similar entre las mismas, producto de la fuerte influencia que tiene la aceleración con el VSP. Sin embargo, es en los valores más alejados de cero que se observa como se incrementa la influencia de la velocidad sobre el resultado obtenido. Esto puede llevar a considerar

la aceleración como parámetro de análisis de los gases de escape; no obstante, cabe notar que en el caso de requerir un análisis de más de un vehículo y/o ruta de conducción el VSP es un parámetro más adecuado.

Una vez confirmada la validez del VSP como parámetro de análisis para la data recopilada, se puede realizar el análisis del comportamiento de cada una de las emisiones del vehículo bajo estudio, se buscará identificar una curva de comportamiento que permita predecir los valores que tendrá el flujo de cada especie para distintos valores del VSP. Para esto, el primer paso a seguir es la elaboración de la distribución del VSP, y agrupar la data en *bins* para analizar la distribución de los flujos máxicos de emisiones vehiculares en cada *bin*. Para así poder establecer la probabilidad de que un punto se encuentre en dicha zona. En cuanto a los valores atípicos mencionados, el análisis de la distribución, tanto del VSP como de los flujos máxicos en conjunto, permitirá establecer un escenario más completo respecto al comportamiento global de los gases de escape. Entonces, la primera agrupación de valores del VSP se dio de la siguiente forma (ver Tabla 3.8).

TABLA 3.8: *BINS* PARA VSP

Bin		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
VSP (kW/ton)	Inf.	-80.0	-44.0	-39.9	-35.8	-31.7	-27.6	-23.4	-19.3	-15.2	-11.1
	Sup.	-44.0	-39.9	-35.8	-31.7	-27.6	-23.4	-19.3	-15.2	-11.1	-7.0

Bin		10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
VSP (kW/ton)	Inf.	-7.0	-2.9	1.2	5.3	9.4	13.6	17.7	21.8	25.9	30
	Sup.	-2.9	1.2	5.3	9.4	13.6	17.7	21.8	25.9	30	1000

Se puede observar en la Tabla 3.8, que los valores límite de los *bins* son distintos entre si. Estos fueron tomados de la metodología del modelo IVE (2008), la cual fue seleccionada debido a la diferencia en la cantidad de puntos a lo largo del VSP; y, permite presentar un mejor panorama de la distribución.

Asimismo, se debe tener en cuenta que uno de los objetivos de este trabajo, es poder establecer un patrón de comportamiento que permita, en un futuro (y con una mayor cantidad de datos), hacer una predicción del comportamiento de las emisiones para un vehículo en la ciudad de Lima Metropolitana. Lo cual, en el caso del *set* de data con el que se ha trabajado no es estrictamente posible.

Sin embargo, los resultados obtenidos, han permitido investigar las causas de dichas diferencias con otros experimentos como los mostrados en el Capítulo 1. Y como resultado de esto, se ha encontrado que uno de los principales factores es la medición del flujo de aire que ingresa al motor. Para ilustrar este hecho, se ha seleccionado el set de datos PCT03 cuya figura se muestra a continuación. (ver Figura 3.13).

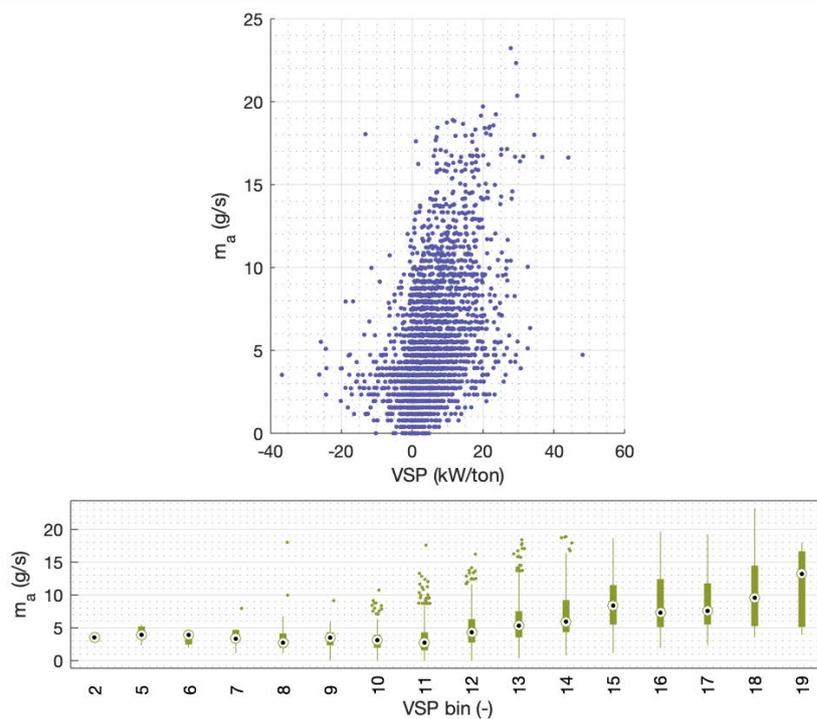


FIGURA 3.13: DISTRIBUCIÓN DE FLUJO MÁSCICO DE AIRE VS VSP PARA EL PCT3E7.8

En la Figura 3.13, se observa la similitud entre la forma de la distribución de puntos del flujo másico de aire con el flujo de cada una de las especies (figuras Figura 3.9, Figura 3.10, Figura 3.11 y Figura 3.12). Entonces, y dado que el flujo másico de aire es un dato que se obtiene a través de una medición directa, se puede atribuir la forma y concentración de puntos de los flujos másicos a las incertidumbres del instrumento utilizado para esta medición.

Esto concluye el análisis preliminar de la data obtenida, cuyos resultados permiten realizar el análisis del comportamiento de ambas composiciones de etanol, así como en análisis secundario de los regímenes de funcionamiento; lo cual, se presenta en el siguiente capítulo.

Capítulo 4:

Resultados y Análisis

Una vez procesada la data obtenida, se puede analizar el comportamiento de los flujos de emisiones, de acuerdo con los objetivos planteados. Para esto, se propone que el análisis se lleve a cabo en dos partes. En la primera parte, un análisis individual de cada uno de los combustibles utilizados (Gasohol E7.8 y Gasohol E10); el cual está compuesto por: los resultados del VSP y la relación entre los flujos de emisiones, así como los resultados del procesamiento de la data a través de los *bins* establecidos.

En la segunda parte, se presenta el análisis comparativo de ambas composiciones de gasolina-etanol. En primer lugar, se muestra la comparación del funcionamiento por régimen. En este punto se observa como se comporta el VSP cuando el vehículo opera a velocidad constante, en relación al comportamiento en condiciones de tráfico. La utilidad de este análisis desde un punto de vista práctico está en que, el conocer el comportamiento de las emisiones a velocidad constante puede ayudar a regular la velocidad establecida en puntos de la ciudad como la autopista Ramiro Prialé (lugar donde se realizaron los ensayos PVC), la Vía de Evitamiento o la Av. Paseo de la República que son corredores viales donde los vehículos pueden a velocidad constante. En segundo lugar, se presenta la comparación entre las dos mezclas gasolina-etanol; con el objetivo de determinar si el aumento de etanol en la mezcla actual (gasohol E7.8) tiene un efecto desde el punto de vista de la contaminación ambiental.

Las planillas de resultados obtenidas para cada uno de los ensayos se pueden encontrar en los Anexos 2 y 3.

4.1 ANÁLISIS PARA CADA COMPOSICIÓN DE COMBUSTIBLE

El análisis que se presenta a continuación tiene como objetivo mostrar los resultados de los procedimientos mencionados en el capítulo anterior. Al estudiar el comportamiento de cada composición gasolina – etanol (E7.8 y E10), se puede establecer los parámetros a partir de los cuales se va a realizar la comparación entre ambas. Asimismo, se puede contrastar los resultados obtenidos en relación al trabajo hecho por Jiménez-Palacios (1999) y cuales con las posibles causas de las diferencias encontradas.

4.1.1 RESULTADOS OBTENIDOS CON GASOHOL E7.8

Los resultados presentados a continuación corresponden a los ensayos codificados como PVC01 y PVC02, para ensayos a velocidad constante (realizados a 60 km/h aproximadamente), y los ensayos del PCT01 al PCT04 para ensayos en condiciones de tráfico.

POTENCIA ESPECÍFICA VEHICULAR

En primer lugar, se presenta el histograma de distribución del VSP para todo el conjunto de datos correspondiente al gasohol E7.8, la gráfica de probabilidad y el diagrama de cajas (Figura 4.1). El histograma de distribución permite observar cuanto tiempo pasa el vehículo en cada uno de los *bins*, debido a que la frecuencia de medición fue de un segundo entre cada toma de datos. A partir de esto, se presenta la gráfica de probabilidad que permite observar como se comporta la data discreta y verificar si existe una función continua que exprese dicho comportamiento. Finalmente, el diagrama de cajas permite identificar los datos atípicos existentes en la distribución e identificar la data representativa.

Entonces, al observar el histograma de distribución del VSP se ve que este tiene forma unimodal cuasi simétrica con cola a la derecha, motivo por el cual al inicio se podría asumir una distribución normal. Lo cual, quedaría respaldado por la cercanía entre los valores de la media y mediana, que son de 4.11 y 3.44 kW/ton respectivamente. Por otro lado, se observa una alta concentración en los datos alrededor de los valores centrales de la distribución, que tiene una desviación estándar de 6.44. Esto en términos prácticos se traduce en que el vehículo ensayado pasa la mayor parte del tiempo operando a bajas

velocidades; lo cual, es consecuente con la experiencia actual de manejo en Lima y es una característica del tránsito irregular definido por Jaikumar *et al.* (2017).

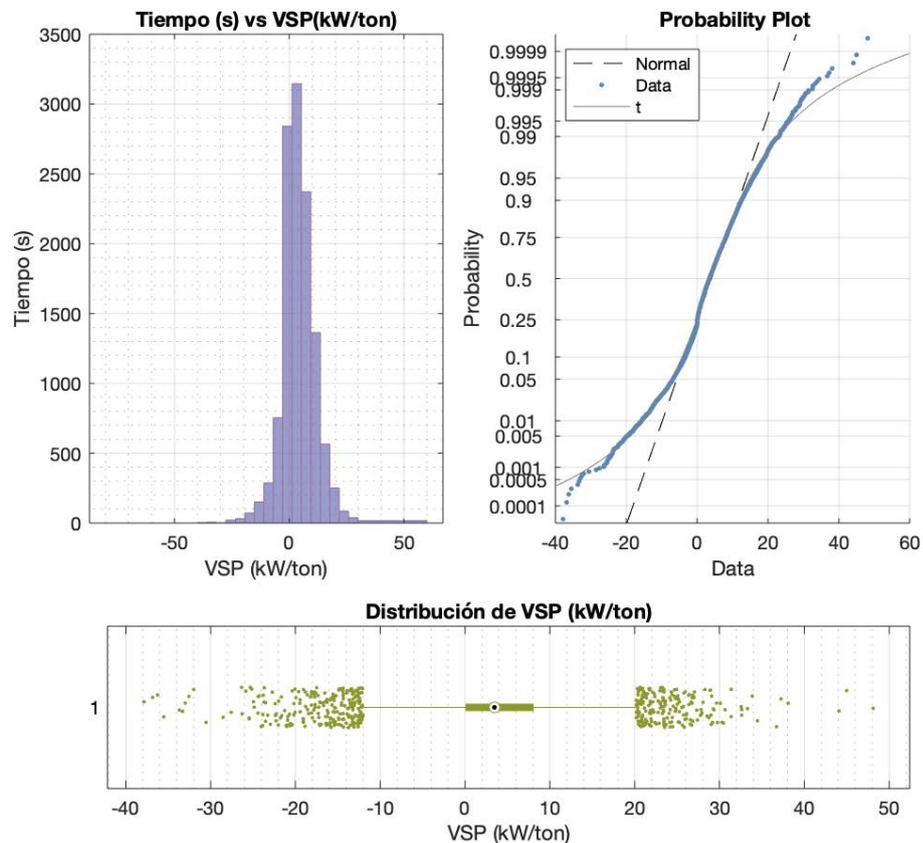


FIGURA 4.1: HISTOGRAMA, GRÁFICA DE PROBABILIDAD Y DIAGRAMA DE CAJAS PARA TODOS LOS ENSAYOS CON GASOHOL E7.8

Sin embargo, para poder confirmar la forma de la distribución y establecer el comportamiento de la data de forma continua se debe observar la gráfica de probabilidad a partir del cual se pueda realizar una prueba de distribución. Entonces, dado que en un inicio se pensó que se trataba de una distribución normal estándar, se ha colocado la recta correspondiente y se observa que no se trata de esa distribución; por lo que, al buscar entre alternativas similares (con la ayuda de la herramienta de ajuste de Matlab) se encuentra que la distribución t es la que mejor se ajusta al set de datos. Para certificar esto, además de la gráfica, se realizó una prueba t, cuya hipótesis nula es que la distribución es normal con media μ y distribución estándar σ y la distribución no rechazó la hipótesis. Esto indica finalmente que, el que se trate de una distribución t se puede deber a la cantidad de ensayos realizados, que es el principal motivo por el cual un set de data tendría dicha distribución en lugar de una distribución normal.

Finalmente, para la identificación de valores atípicos, se seleccionó la técnica del diagrama de cajas con la ayuda del cual se identificó el rango de valores que se consideran representativos, el cual se encuentra entre -12.39 y 20.52 kW/ton. Pero, para comprobar la validez de dichos resultados, se realizó el cálculo adicional de la variable de simetría denominada *Medcouple*, cuyos valores oscilan entre -1 y 1 y es igual a 0 cuando la distribución es perfectamente simétrica.

En la Tabla 4.1 se encuentra dicho valor identificado como MC. El valor resultante del cálculo fue de 0.14, lo que significa el diagrama simple es adecuado como representación de la data; entonces, el número de datos tomados que se consideran atípicos es de 450 de un total de 12010. Asimismo; se calcularon otros valores asociados a la distribución como la varianza y los cuartiles 1 y 3; lo cual permite establecer una figura completa de la distribución de la data.

TABLA 4.1: RESUMEN ESTADÍSTICO PARA ENSAYOS CON GASOHOL E7.8

μ	Mediana	σ	σ^2	IQR	Q ₁	Q ₃	Max	Min	Nº Atípicos	MC
3.99	3.46	7.09	50.26	8.05	0.06	8.12	20.19	-12.06	450	0.14

Se puede observar que los valores obtenidos permiten obtener una confirmación numérica de las observaciones realizadas. La media y la mediana tienen valores similares, lo cual corresponde a la ligera asimetría de la distribución. En cuanto a la desviación estándar y a la varianza, estas evidencian la alta concentración de datos alrededor de las medidas de tendencia central; mientras que los valores de Q₁, Q₃, Max y Min permiten establecer puntos característicos a partir de los que se podrá comparar ambas composiciones gasolina-etanol más adelante en el capítulo.

Por otro lado, si se observa los resultados mostrados en el diagrama (ver Figura 4.1) con las distribuciones obtenidas por Jiménez-Palacios, (1999), la distribución obtenida tiene la misma forma. Sin embargo, la moda se encuentra más cerca a cero. Este hecho se puede tomar como una prueba de la necesidad de establecer un ciclo de conducción local para poder hacer una análisis y proyección adecuado de emisiones contaminantes. Además, esto demuestra que, en condiciones de tránsito, la distribución de valores cinemáticos es distinta a los ciclos de manejo ensayados por Jiménez-Palacios, (1999).

FACTORES DE EMISIONES

Una vez calculado el VSP y analizada la naturaleza de los valores atípicos, se procede a visualizar cual es la relación entre dicho parámetro y el flujo de emisiones; así como, su concentración.

Para comenzar, se presenta las gráficas correspondientes a la concentración de emisiones en relación con VSP (ver Figura 4.2). En dicha figura se observa que no hay una relación aparente entre el VSP y la concentración de emisiones. Sin embargo, se pueden observar características particulares en las gráficas como el incremento en la variación de valores en la concentración del CO₂ conforme el VSP se acerca a la media y la división de valores del CO en distintos grupos.

Asimismo, otro punto a tener en cuenta es que la concentración de parámetros es un parámetro regulado por ley; por lo que, en este gráfico se puede observar si los valores obtenidos a partir de la medición directa cumplen con lo establecido.

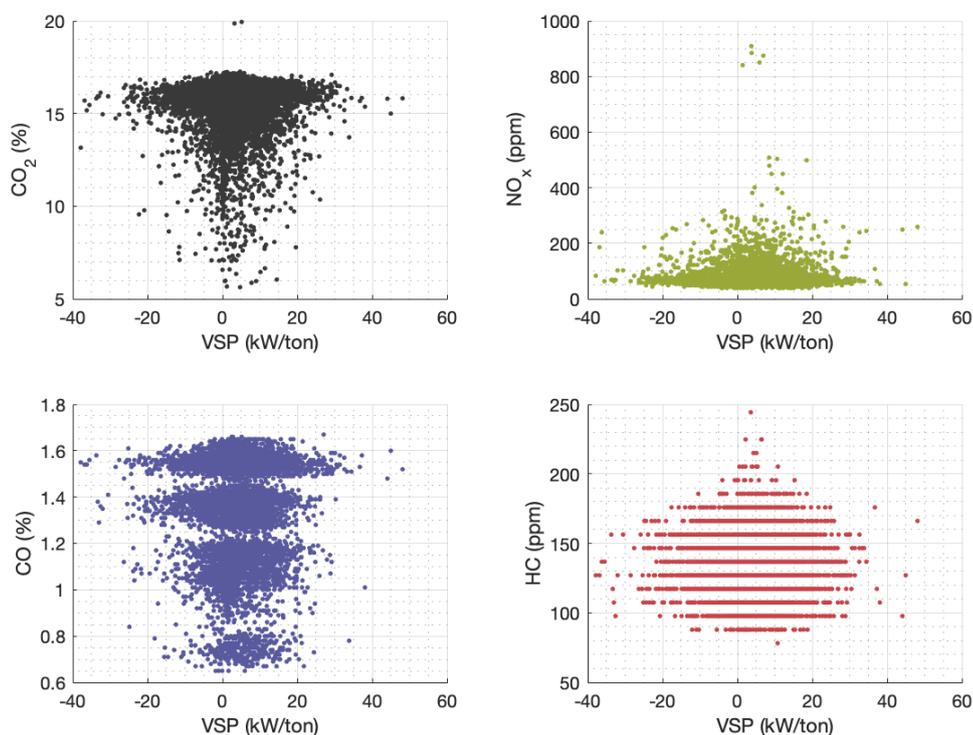


FIGURA 4.2: CONCENTRACIÓN DE EMISIONES VS. VSP
TODOS LOS ENSAYOS REALIZADOS CON GASOHOL E7.8

Entonces, si se ubica al vehículo ensayado en la Tabla 0.2² se puede observar que ninguno de los valores en cuestión se encuentra dentro de lo establecido por la norma. En el caso del CO, la norma establece que para vehículos en circulación fabricados desde el año 2003 en adelante, el límite máximo es de 0.5 %, lo que pone la gráfica en su totalidad por encima de dichos límites. En el caso del HC, el límite es de 100 ppm; por lo que, los valores registrados también se encuentran por encima del límite establecido. En cuanto a los límites para el NO_x, no hay una normativa aprobada para vehículos en circulación.

En segundo lugar, y dado que no se observa una relación directa de la concentración de emisiones con el VSP, se presenta la relación con el flujo de emisiones (ver Figura 4.3).

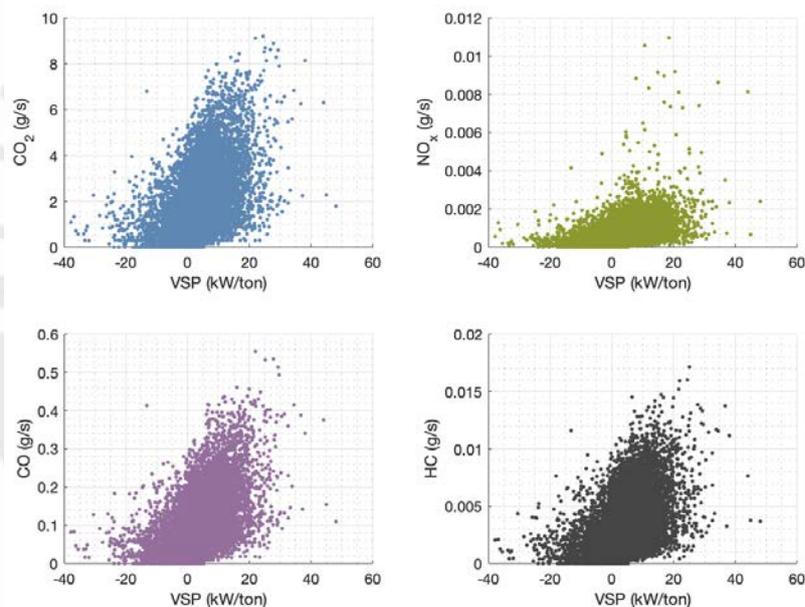


FIGURA 4.3: FLUJO DE EMISIONES (g/s) vs VSP (kW/ton)

En la Figura 4.3 se observa que, a diferencia de las concentraciones en los gases de escape, existe una mejor correlación entre el flujo de contaminantes y el VSP. De hecho, se puede observar que la relación es similar a la presentada por Jiménez-Palacios, (1999); quien afirma que, para valores del VSP menores o iguales a cero, los flujos de emisiones disminuyen y; a partir de dicho valor, se incrementan. En cuanto a la forma de la correlación, se puede observar que esta es positiva y se curva ligeramente a la derecha.

² Se seleccionó esta tabla, en lugar a la tabla de vehículos nuevos debido a que para el momento en que esta ley entró en vigencia, el vehículo se hallaba en circulación.

Sin embargo, a diferencia con el trabajo realizado por Rodríguez *et. al*, los valores se encuentran más dispersos y por lo que, al momento de realizar una regresión polinómica similar a la realizada por los autores, los valores de R^2 fueron completamente distintos (cercaos a 0.3). Por este motivo se descartó que existiera una relación cuadrática entre el flujo de contaminantes y el VSP. Y, para poder analizar con más detalle esta diferencia, se realizó el análisis por bin, el cual será presentado a continuación.

ANÁLISIS DE DISTRIBUCIÓN

A partir la data presentada en la Figura 4.3 se elaboraron los diagramas de cajas por *bin*, con la finalidad de determinar cuales son los valores representativos de la composición y observar con mayor claridad el patrón interno de comportamiento. Esto permitirá a su vez ratificar lo mencionado respecto al trabajo elaborado por Jiménez-Palacios, (1999). A continuación, se presenta el diagrama de cajas (Figura 4.4).

En la Figura 4.4 se observa entonces, que para *bins* con valores iguales o menores a 11, la media tiene un valor estable casi constante; mientras que, entre el *bin* 11 y 15 existe un incremento del flujo másico. A partir de dicho bin, el incremento disminuye considerablemente. Asimismo, en el diagrama se puede notar que los *bins* con mayor cantidad de valores atípicos encuentran agrupados entre los *bins* 8 al 16 para todos los compuestos evaluados.

Además, cabe notar que esos son los *bins* centrales en la distribución del VSP, donde el vehículo pasa la mayor cantidad de tiempo; lo cual, puede ser comprobado si se observan los valores presentados en la Tabla 4.1 y Tabla 3.8. Dichas tablas en conjunto permiten establecer la relación entre los valores de VSP y los *bins* correspondientes.

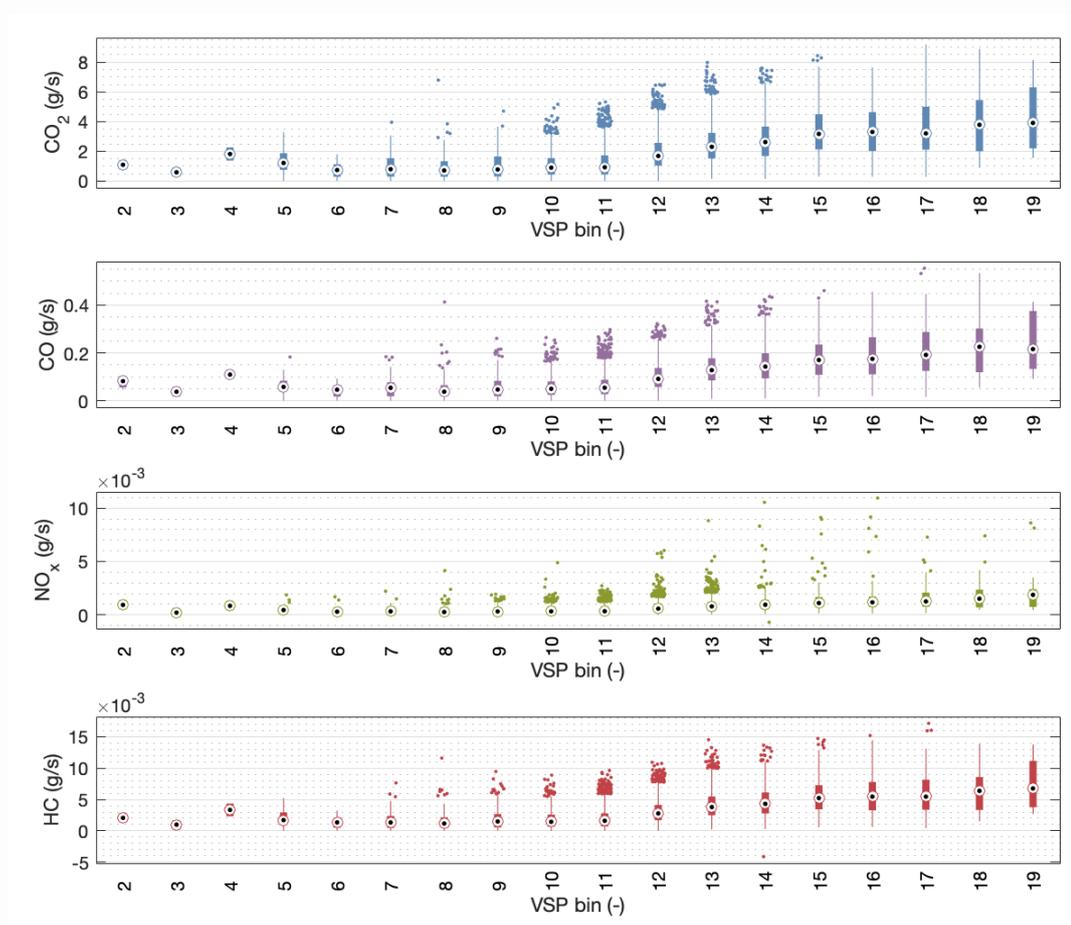


FIGURA 4.4: DIAGRAMA DE CAJAS PARA EMISIONES PARA TODOS LOS ENSAYOS REALIZADOS CON GASOHOL E7.8

Entonces, en el caso del gasohol E7.8 el 50% de la data correspondiente a los flujos másicos (valores entre Q_1 y Q_3) se encuentra entre los *bins* 11 y 13. Y, si se observa la distribución del VSP presentada al inicio (ver Tabla 4.1) la mayor cantidad de datos se encuentra entre los *bins* 8 y 16. Por otra parte, para cada una de las especies se realizó el cálculo del resumen estadístico y gráfica la distribución de cada *bin*. Es a partir de estos valores que se realizará la comparación entre ambas composiciones. La Figura 4.5 muestra la distribución del flujo másico del CO_2 para cada *bin* y en la Tabla 4.2 se muestra los valores obtenidos para el CO_2 a manera de ejemplo³.

³ Valores y distribución para las demás especies se encuentran en el Anexo 2 del presente trabajo.

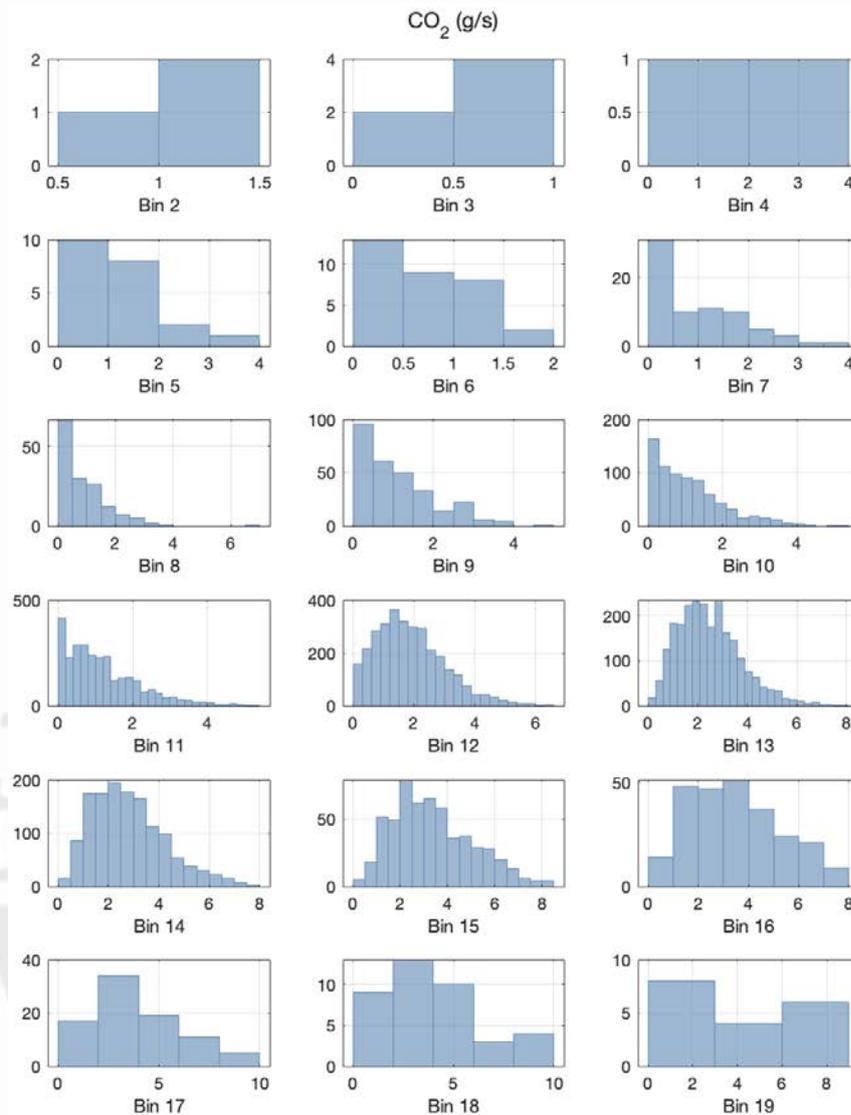


FIGURA 4.5: DISTRIBUCIÓN DE FLUJO MÁSSICO DEL CO₂ POR BIN

En la Figura 4.5 se puede observar con mayor detalle como varía la distribución del flujo de CO₂ para cada *bin* y así poder confirmar lo mencionado en la Figura 4.4. Con respecto a los bins con mayor cantidad de datos, se observa que para los *bins* mencionados (11 al 13), la cantidad de observaciones está entre las 200 y 500. Por otro lado, una de las características más evidentes que muestra este gráfico es la variación de la distribución conforme aumenta el número de *bin*. A partir del *bin* 5 se observa que las distribuciones presentan pronunciadas colas a la izquierda, lo que explica la cantidad de puntos que son considerados *outliers*. Sin embargo, a partir del *bin* 15, la distribución comienza a volverse más simétrica, lo que explica que haya menos puntos que se consideren *outliers*.

TABLA 4.2: RESUMEN ESTADÍSTICO DE CO₂
PARA MEZCLA GASOLINA-ETANOL AL 7.8%

Bin	Media	σ	Q1	Q3	MC	IQR	Min	Max
3	0.58	0.00	0.58	0.58	0.00	0.00	0.58	0.58
5	1.55	1.17	0.85	2.25	0.42	1.40	-1.25	4.35
6	0.68	0.40	0.37	0.88	-0.01	0.51	-0.40	1.65
7	0.65	0.73	0.28	0.77	0.82	0.48	-0.44	1.49
8	0.83	0.78	0.28	1.22	0.35	0.94	-1.13	2.63
9	1.03	0.90	0.30	1.52	0.37	1.22	-1.52	3.34
10	1.00	0.80	0.43	1.40	0.11	0.98	-1.04	2.87
11	1.11	0.88	0.44	1.65	0.22	1.20	-1.36	3.45
12	1.84	1.09	1.04	2.51	0.14	1.47	-1.17	4.72
13	2.43	1.21	1.52	3.20	0.10	1.68	-1.00	5.72
14	2.76	1.41	1.67	3.62	0.08	1.95	-1.25	6.54
15	3.38	1.68	2.12	4.52	0.11	2.40	-1.47	8.12
16	3.52	1.79	2.03	4.70	0.10	2.68	-1.99	8.72
17	3.85	2.29	2.14	5.06	0.30	2.92	-2.25	9.44
18	3.99	2.23	2.00	5.41	0.00	3.41	-3.12	10.53
19	4.16	2.26	2.06	6.32	0.10	4.26	-4.33	12.70

Al observar los diagramas y la tabla mostrada, cabe notar que para los *bins* que se encuentran fuera del rango 8-16 el número de datos atípicos se hace menor; sin embargo, esto simplemente quiere decir que los valores se encuentran más uniformemente distribuidos. Lo cual, es consistente con lo observado en la Figura 4.3 y queda confirmado por los valores de IQR que se muestran en la Tabla 4.2. Sin embargo, esto no quiere decir que los puntos en si no puedan ser atípicos en el contexto de la distribución en general que comprende tanto a los flujos másicos como al VSP.

Otro punto que se debe tomar en cuenta es la variación en la distribución de los flujos másicos en los diferentes *bin*. En la Figura 4.3 se puede observar que conforme el valor del VSP aumenta (y por ende el número de *bin*) la data se vuelve más dispersa, lo cual queda confirmado en la Figura 4.4, donde para *bins* con valores mayores a 16, no se observa datos atípicos. Sin embargo, la Figura 4.5 muestra que, además de dispersarse los valores del flujo másico, la distribución de estos se uniformiza.

REGÍMENES DE OPERACIÓN

En cuanto a los regímenes de operación, el experimento realizado contó con dos situaciones específicas: a velocidad constante y en condiciones de tráfico. El observar el comportamiento de régimen en relación con otro, permitiría confirmar el efecto que tiene la aceleración en el VSP; ya que, en un régimen a velocidad constante, dicho parámetro cobra mucha mayor importancia. A continuación, se presentarán las gráficas de flujo másico versus VSP.

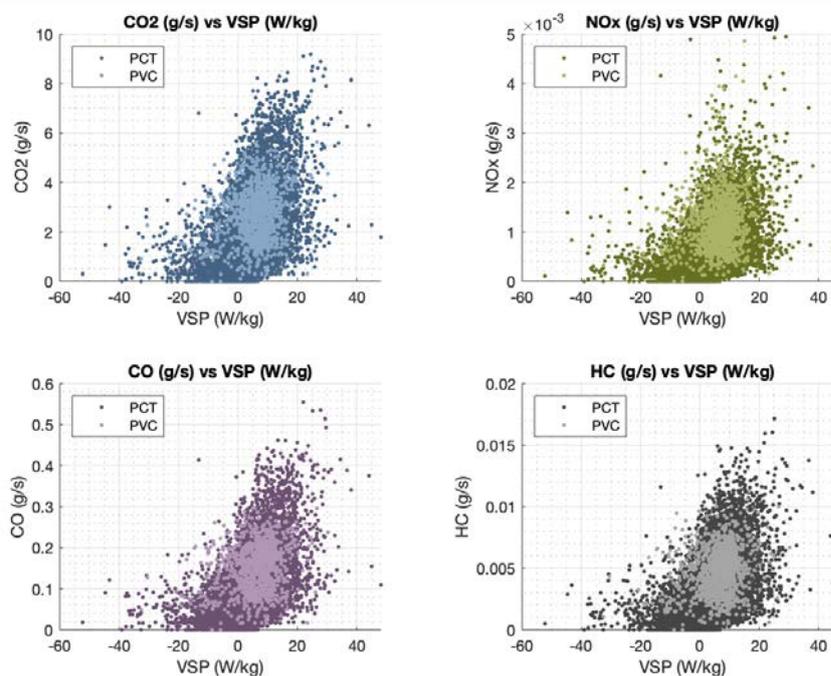


FIGURA 4.6: FLUJO MÁSSICO DE CONTAMINANTES VS VSP
PARA PRUEBAS EN CONDICIONES DE TRÁFICO VS PRUEBAS A VELOCIDAD CONSTANTE
UTILIZANDO GASOHOL E7.8

En la Figura 4.6 se observa en un tono más claro los puntos correspondientes a las pruebas a velocidad constante y en tono oscuro, las pruebas en condiciones de tráfico. En los cuatro gráficos se puede observar un comportamiento similar en que los puntos correspondientes a las pruebas a velocidad constante se encuentran en el medio de los puntos correspondientes a condiciones de tránsito. Entonces, si se compara la distribución de la velocidad en relación con el VSP mostrada en la Figura 3.6 con la figura anterior, se puede notar una tendencia de distribución similar. En ambas la distribución de puntos es vertical, y se agrupan en torno al valor del VSP correspondiente a la velocidad del

vehículo. Sin embargo, para comprobar lo mencionado, se ha calculado los valores representativos para cada una de las especies en cada régimen (ver Tabla 4.3).

En la Tabla 4.3 se puede observar que, para todas las especies, los valores la media son mayores para todos los ensayos a velocidad constante, lo cual es de esperarse dada la forma del gráfico. En cuanto a los valores de Q_1 y Q_3 son mayores en el caso de los ensayos a velocidad constante; sin embargo, hay un traslape entre ambas las distribuciones.

TABLA 4.3: COMPARACIÓN DE VALORES REPRESENTATIVOS PARA GASOHOL 7.8

Especie	Ensayo	μ	σ	Mediana	IQR	Q_1	Q_3	MC
CO₂	PCT	1.8983	1.4341	1.6182	1.7724	0.8682	2.6407	0.1733
	PVC	2.7143	1.0685	2.7897	1.5372	1.8714	3.4087	-0.1183
CO	PCT	0.1020	0.0756	0.0851	0.0918	0.0477	0.1396	0.2291
	PVC	0.1525	0.0564	0.1611	0.0849	0.1086	0.1935	-0.2199
NO_x	PCT	0.0007	0.0006	0.0005	0.0006	0.0003	0.0009	0.2317
	PVC	0.0012	0.0008	0.0012	0.0007	0.0008	0.0015	0.0280
HC	PCT	0.0031	0.0024	0.0026	0.0029	0.0014	0.0043	0.2242
	PVC	0.0048	0.0019	0.0048	0.0027	0.0034	0.0061	-0.0793

4.1.2 RESULTADOS OBTENIDOS CON GASOHOL E10

Un análisis similar al anterior fue realizado para la mezcla gasolina-etanol al 10%. Los ensayos realizados con este porcentaje de etanol son PVC3 y PVC4 a una velocidad constante de 60 km/h y los ensayos PCT5 – PCT8 en condiciones de tráfico. A continuación, se presenta los resultados obtenidos.

POTENCIA ESPECÍFICA VEHICULAR

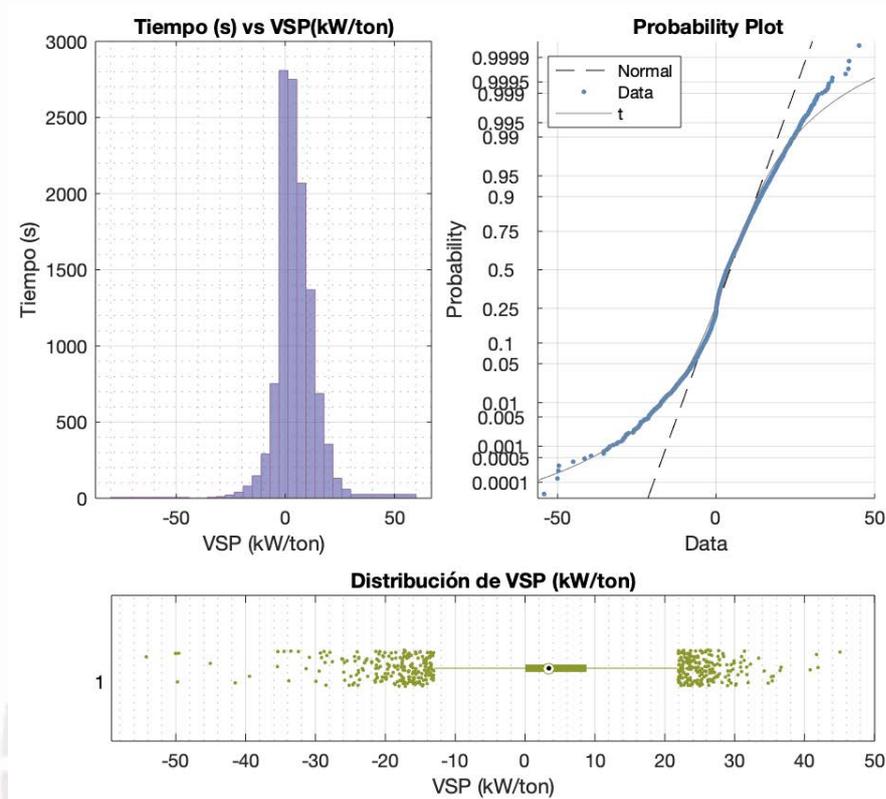


FIGURA 4.7: HISTOGRAMA Y GRÁFICA DE PROBABILIDAD PARA TODOS LOS ENSAYOS REALIZADOS CON GASOHOL E10

El histograma presenta una distribución unimodal con cierto grado de simetría y una cola al lado derecho. Sin embargo, en la gráfica de probabilidad se puede observar una variación en los valores superiores respecto a la curva t, mientras que los valores menores a Q_3 se ajustan a dicha distribución.

Esto, puede deberse al tamaño de la muestra y la existencia de valores atípicos, que son características que diferencian a la distribución normal de una distribución t (De Veaux, Velleman, & Bock, 2012). En cuanto al número de datos atípicos encontrados es de 299 para una población de 11609. A continuación, se presenta la tabla resumen de valores estadísticos.

TABLA 4.4: RESUMEN ESTADÍSTICO PARA TODOS LOS ENSAYOS REALIZADOS CON GASOHOL E10

Media	Mediana	σ	IQR	σ^2	Q1	Q3	Max	Min	Nº Atípicos	MC
4.45	3.40	7.21	8.70	66.80	0.05	8.75	21.80	-12.10	299	0.20

Asimismo, se puede observar un comportamiento consistente con lo encontrado para la composición E7.8. Esto se debe a que el VSP es un parámetro cinemático que permite visualizar el comportamiento del movimiento del vehículo; lo cual, como se ha mencionado en el Capítulo 1, es uno de los principales factores que afectan las emisiones.

FACTORES DE EMISIONES

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para los factores de emisiones del E10. Primero, se presenta las gráficas correspondientes a la concentración de emisiones respecto al VSP (ver Figura 4.8). En este punto, se espera obtener un resultado similar al del E7.8 conforme a lo observado para la composición anterior (E7.8).

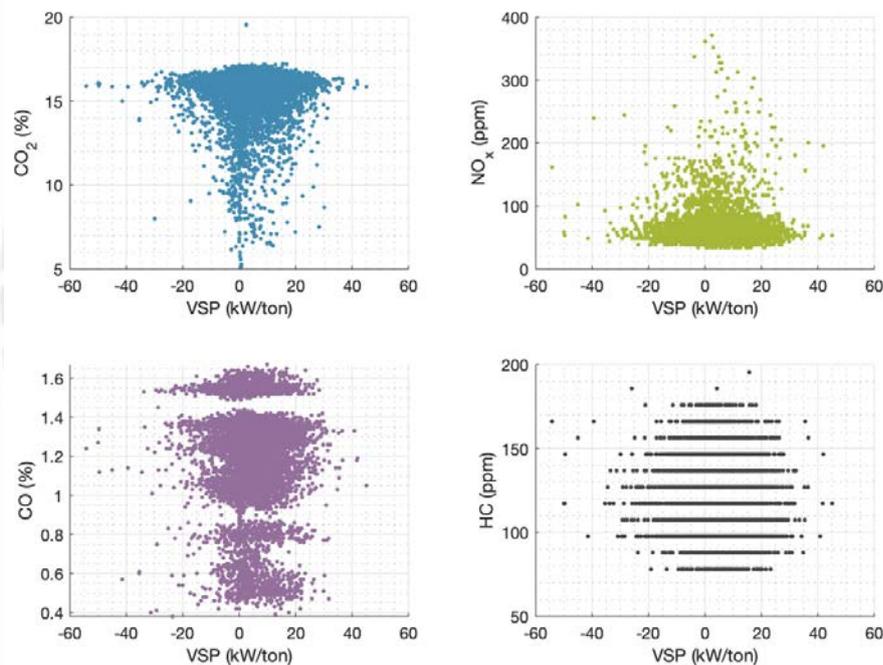


FIGURA 4.8: CONCENTRACIÓN DE EMISIONES VS. VSP PARA MEZCLA GASOLINA-ETANOL 10%

De acuerdo a lo señalado, la Figura 4.8 muestra que no existe una relación entre la concentración y el VSP; por lo que se utilizará, una vez más, la comparación con el flujo másico. En cuanto a la comparación con los valores regulados por la legislación, el E10 tampoco cumple con los estándares requeridos. Los valores de CO se encuentran muy por encima del 0.5 estipulado, el HC muestra un comportamiento similar en que el aproximadamente 1/3 de valores se encuentra dentro de lo establecido (Max. 100 ppm).

En cuanto al comportamiento de los flujos másicos de emisiones, se presenta a continuación la relación con el VSP.

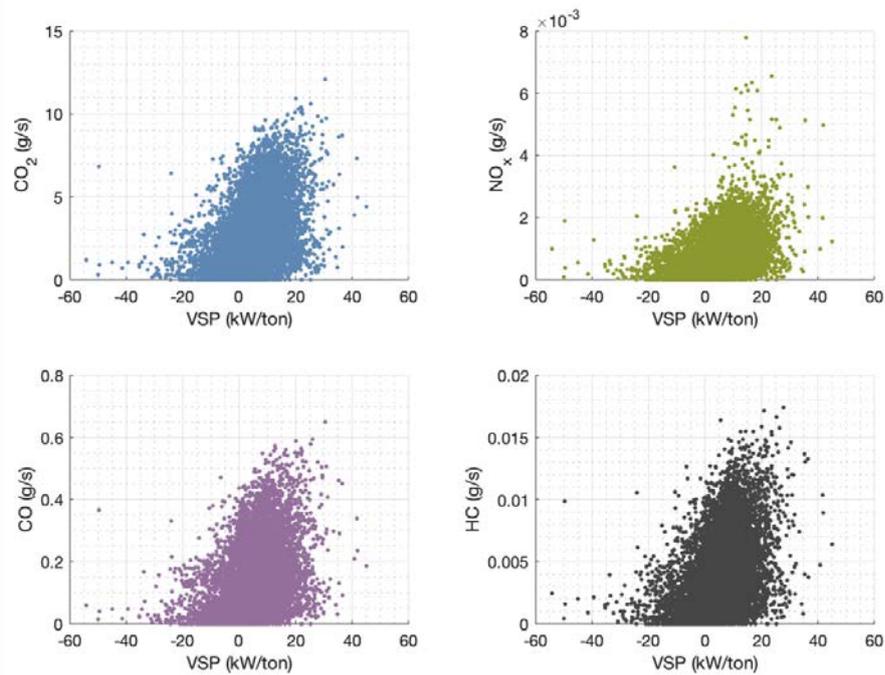


FIGURA 4.9: FLUJO DE EMISIONES VS. VSP PARA TODOS LOS ENSAYOS REALIZADOS CON GASOHOL E10

Entonces, en la Figura 4.9 se puede observar que, de acuerdo a lo esperado, existe una mejor relación entre los valores del VSP y el flujo másico de las emisiones. Los valores son menores en la parte izquierda de la gráfica correspondiente a valores negativos del VSP, y crecen considerablemente conforme los valores se alejan hacia el lado positivo. Asimismo, cabe notar que parece existir un límite cuando el VSP tiene un valor de 20 kW/ton, y no hay muchos puntos cuyo valor sea mayor. Esto es específicamente visible en el caso del HC y está directamente ligado al VSP como parámetro que expresa las características de manejo. Por este motivo, al hacer la regresión se debe tener en cuenta que la curva no continúa hasta el infinito, sino que esta se estabiliza a partir de cierto valor (ver Figura 1.4 como ejemplo).

ANÁLISIS DE DISTRIBUCIÓN

Por otro lado, al igual que en caso anterior, se ha realizado el análisis de la distribución tomando dos enfoques distintos. En primer lugar, se realizó la segmentación de la data en *bins* seleccionado de acuerdo a lo mencionado en el Capítulo 3: y se obtuvo un diagrama de cajas, el cual se presenta a continuación (ver Figura 4.10).

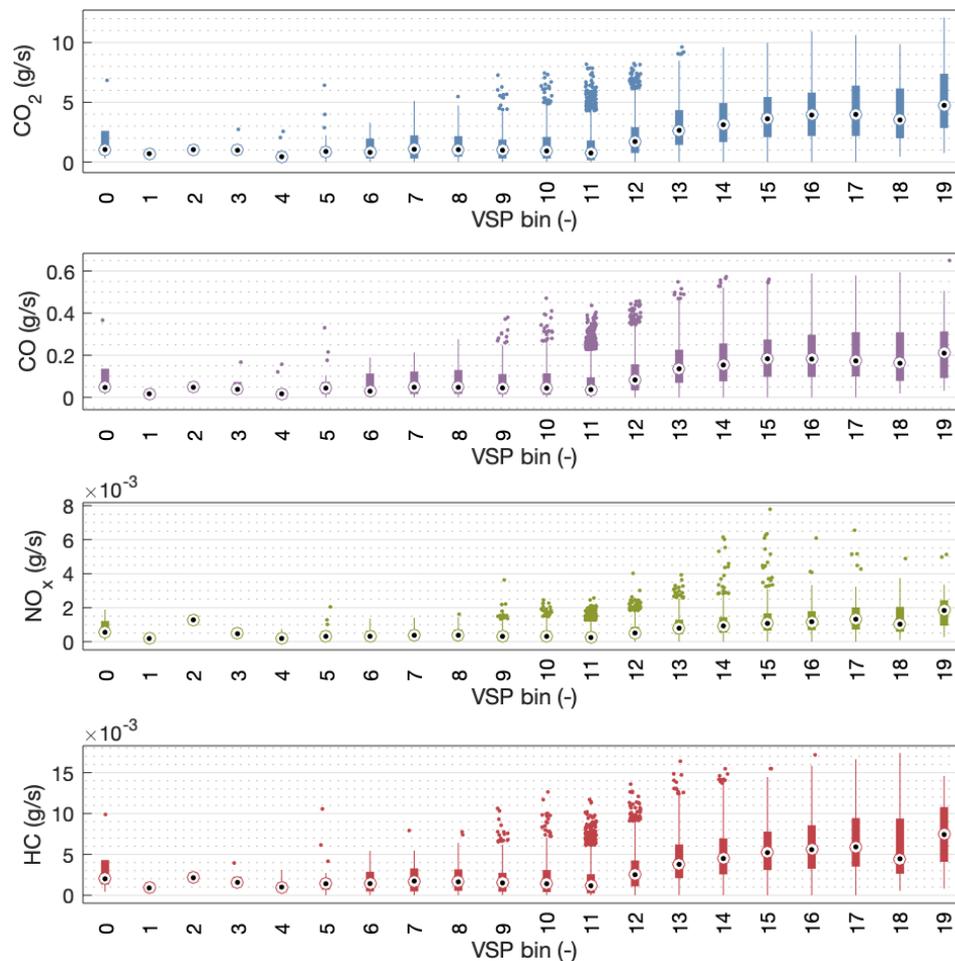


FIGURA 4.10: DIAGRAMA DE CAJAS DE EMISIONES PARA TODOS LOS ENSAYOS REALIZADOS CON GASOHOL E10

Se puede observar en la Figura 4.10 un comportamiento similar al que se viene observando a lo largo del análisis, los resultados para ambas concentraciones en la mezcla gasolina-etanol son consistentes. En el caso de la mezcla al 10%, el VSP tiene un rango mayor; por lo que se tiene *bins* con valores menores a 3 que fue el menor valor encontrado en el caso anterior. Sin embargo, dichos bins contienen una pequeña cantidad de puntos.

En cuanto a los datos atípicos, se observa que entre los *bins* 9 – 15 se encuentra la mayor cantidad de datos atípicos en el caso de las emisiones contaminantes. Lo cual, es consistente con los valores Q_1 y Q_3 del VSP. E igual que en punto anterior, se realizó el cálculo de los valores representativos y gráfica por bin. En la Figura 4.11 y Tabla 4.5 se presentan los resultados para el CO_2 como muestra.

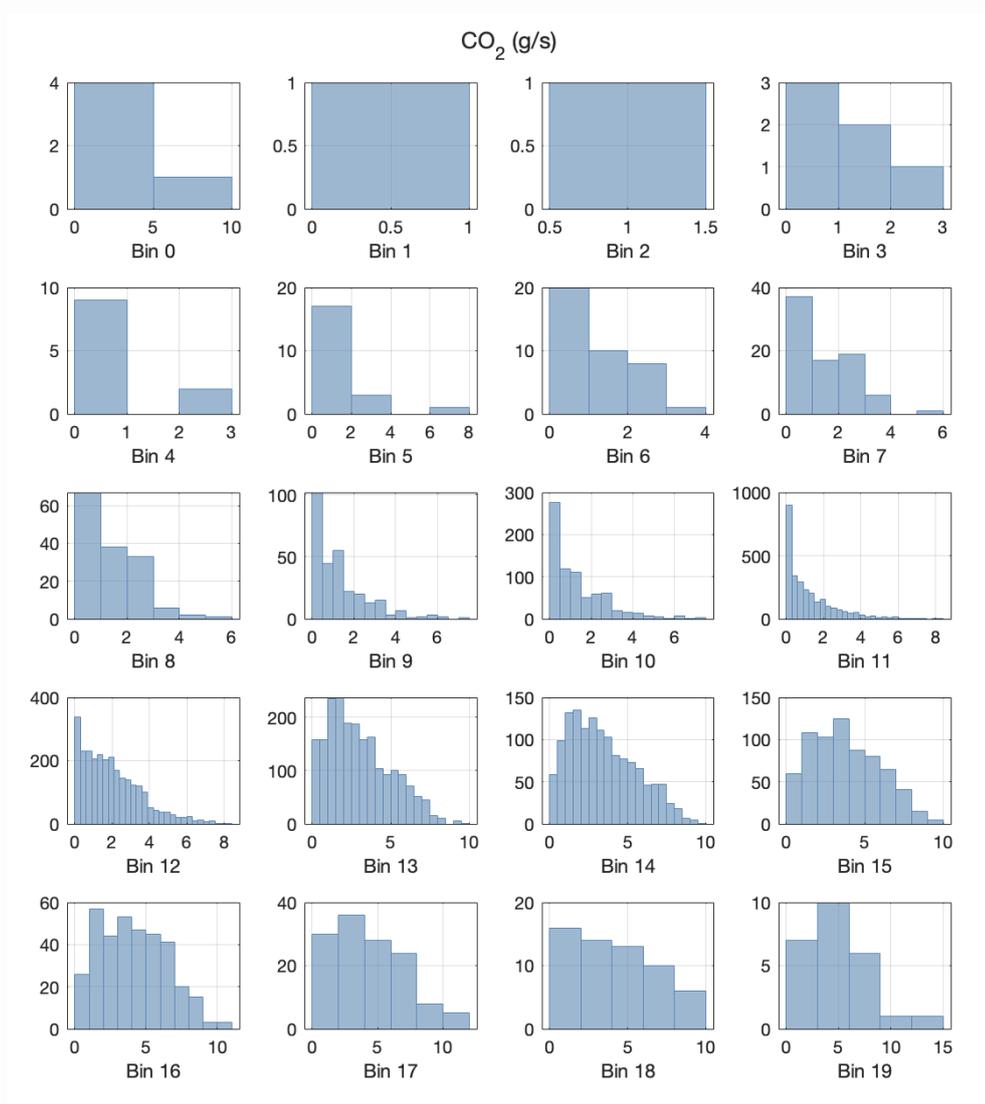


FIGURA 4.11: DISTRIBUCIÓN DE FLUJO MÁSSICO DEL CO₂ POR BIN PARA PRUEBAS CON GASOHOL E10

En la Figura 4.11 se puede observar que, al igual que en el caso del Gasohol E10, la distribución del flujo másico de CO₂ cambia conforme el VSP aumenta. Como se mencionó en el párrafo anterior, los *bins* 9 – 15 tienen la mayor cantidad de datos atípicos, lo cual se evidencia en esta figura por las pronunciadas colas en las distribuciones, en especial los *bins* 9, 10 y 11. Por otro lado, para todos los *bins*, la distribución presenta cola a la derecha.

TABLA 4.5: RESUMEN ESTADÍSTICO DE CO₂
PARA MEZCLA GASOLINA-ETANOL AL 10%

Bin	Media	μ	Q ₁	Q ₃	MC	IQR	Min	Max
3	1.36	0.00	1.36	1.36	0.00	0.00	1.36	1.36
4	0.28	0.00	0.28	0.28	0.00	0.00	0.28	0.28
5	3.98	0.00	3.98	3.98	0.00	0.00	3.98	3.98
6	1.08	0.94	0.30	1.80	0.37	1.50	-1.94	4.05
7	1.45	1.15	0.51	2.23	0.26	1.71	-2.06	4.80
8	1.38	1.23	0.44	2.22	0.33	1.77	-2.22	4.88
9	1.23	1.25	0.30	1.81	0.22	1.51	-1.97	4.08
10	1.19	1.23	0.29	1.82	0.26	1.53	-2.01	4.12
11	1.11	1.25	0.15	1.67	0.31	1.52	-2.13	3.94
12	1.96	1.52	0.75	2.87	0.14	2.12	-2.43	6.05
13	2.99	1.98	1.42	4.30	0.19	2.88	-2.90	8.62
14	3.41	2.08	1.67	4.90	0.15	3.23	-3.18	9.75
15	3.85	2.15	2.11	5.46	0.11	3.34	-2.90	10.48
16	4.14	2.31	2.10	5.86	0.05	3.76	-3.54	11.49
17	4.40	2.67	2.17	6.43	0.16	4.26	-4.21	12.82
18	4.17	2.69	2.03	6.16	-0.10	4.13	-4.16	12.35
19	5.06	3.23	2.37	7.53	0.04	5.16	-5.38	15.28

En la Tabla 4.5, se puede confirmar lo mencionado respecto a la distribución de puntos en los *bins* inferiores (3 - 5). Se puede observar que no se tiene desviación estándar ni IQR y los puntos correspondientes a los cuartiles son iguales; por lo que, se confirma que se trata de un único punto. En cuanto a las diferencias encontradas con la distribución anterior, cabe mencionar que en el caso del E10, la distribución en general es mucho más simétrica, que se confirma a partir de los valores de *Medcouple* que en general son menores a los de E7.8.

REGÍMENES DE OPERACIÓN

A partir de lo mencionado el punto anterior, se realiza la comparación entre los ensayos realizados a velocidad constante y los ensayos en condiciones de tráfico (ver Figura 4.12).

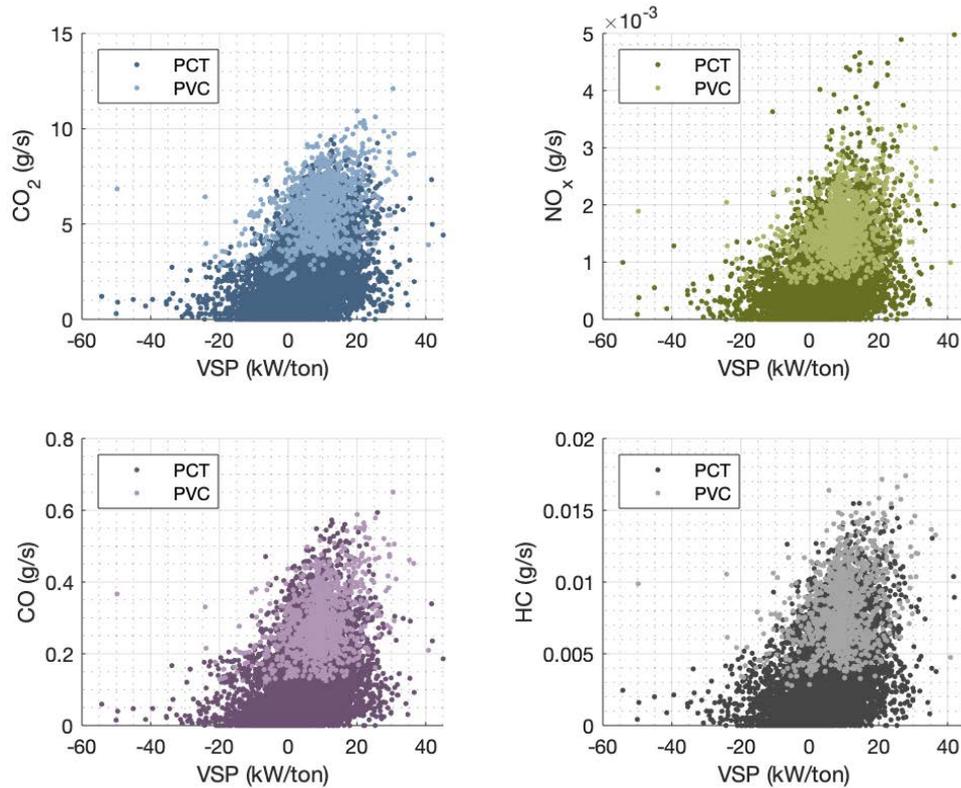


FIGURA 4.12: FLUJO MÁSIICO DE CONTAMINANTE VS VSP PARA PRUEBAS EN CONDICIONES DE TRÁFICO VS PRUEBAS A VELOCIDAD CONSTANTE UTILIZANDO GASOHOL E10

En la Figura 4.12, se puede observar que la distribución es similar a la del E7.8. Sin embargo, a diferencia de esta, los puntos con menor flujo másico de emisiones a velocidad constante se encuentran más arriba que los puntos inferiores de la Figura 4.6. En tres de las cuatro especies (CO₂, CO y HC), se puede observar que, para el mismo valor del VSP, el menor valor de flujo másico para el E7.8 es aproximadamente el doble del caso del E10. En cuanto al NO_x, se observa que dicho valor también es mayor, pero el incremento no es tan grande.

Si bien esto muestra una diferencia notable, se puede observar también una consistencia en la forma de los resultados; lo que, permite establecer una comparación entre ambas composiciones utilizando el VSP como parámetro transversal. A continuación, se presenta la tabla de valores obtenidos (ver Tabla 4.6).

TABLA 4.6: COMPARACIÓN DE VALORES DE CUARTILES PARA ETANOL 10%

Especie	Ensayo	μ	σ	Mediana	IQR	Q ₁	Q ₃	MC
CO ₂	PCT	1.9442	1.6695	1.5500	2.2994	0.6021	2.9015	0.2377
	PVC	5.9512	1.5698	5.9402	2.2441	4.7883	7.0324	-0.0022
CO	PCT	0.1026	0.0953	0.0759	0.1254	0.0283	0.1537	0.2999
	PVC	0.2886	0.0878	0.2802	0.1199	0.2238	0.3437	0.0826
NO _x	PCT	0.0006	0.0006	0.0005	0.0007	0.0002	0.0009	0.2128
	PVC	0.0016	0.0005	0.0016	0.0007	0.0013	0.0019	0.0654
HC	PCT	0.0029	0.0025	0.0023	0.0033	0.0009	0.0042	0.2069
	PVC	0.0081	0.0025	0.0078	0.0035	0.0063	0.0097	0.1367

La Tabla 4.6 mostrada confirma lo mencionado y muestra además que, en el caso del E10, no existe superposición entre los cuartiles de ambos regímenes de operación, lo cual si ocurría en el caso del E7.8. Por ejemplo, en el caso del CO₂; para el E7.8 del valor de Q₁ para PVC es de 1.86 y se encuentra entre 0.87 y 2.64 que son Q₁ y Q₃ para el PCT respectivamente. Mientras que, en el caso de E10 dicho valor es de 4.79 que es mayor que Q₃ para PCT que tiene un valor de 2.90.

Esto quiere decir que, en el caso del E7.8 los valores se encuentran más concentrados y los flujos máxicos son menores. En tanto, en el caso del E10 los valores tienen una mayor distribución; y, como consecuencia los valores del PVC se encuentran más concentrados en la parte superior de la gráfica.

4.2 ANÁLISIS COMPARATIVO

Finalmente, se presenta la comparación entre los combustibles utilizados. En primer lugar, se presenta la distribución de los puntos ensayados para las cuatro especies de emisiones. Estas gráficas corresponden a los primeros valores obtenidos a través de medición directa (ver Figura 4.13), mientras que en la Figura 4.14 se muestra la variación en los flujos de emisiones. A partir de esto, se podrá evaluar la diferencia entre realizar una comparación de flujos y una comparación inicial del comportamiento de las emisiones.

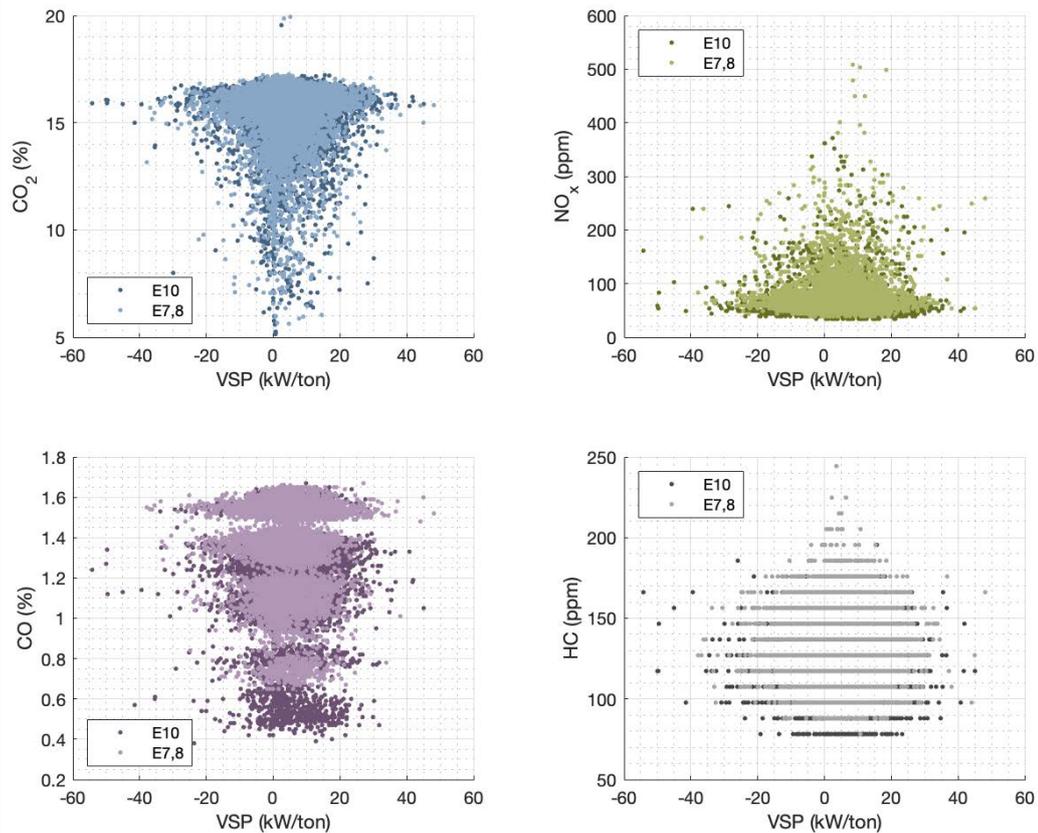


FIGURA 4.13: COMPARACIÓN DE CONCENTRACIÓN DE EMISIONES VS. VSP (E7.8 vs E10) PARA TODOS LOS ENSAYOS REALIZADOS

En la Figura 4.13, se observa que las concentraciones de emisiones no varían entre ambas composiciones en el caso del CO_2 y el NO_x . Mientras que la concentración de CO se reduce significativamente al utilizar E10 y se observa un comportamiento similar, aunque más sutil, en el caso de los HC. En cuanto al CO, el rango observable para E7.8 es entre 0.65% y 1.67%, mientras que cuando se utiliza E10, está entre 0.38% y 1.67%. En el caso de los HC, el mínimo para E10 se encuentra en 79 ppm y el máximo en 196 ppm mientras que para E7.8 el mínimo se encuentra en 78 ppm y el máximo en 244 ppm. A continuación, se muestra la figura correspondiente a los flujos de emisiones; en la cual, se podrá observar si lo mencionado en el punto anterior tiene o no un efecto en la cantidad de emisiones emitidas.

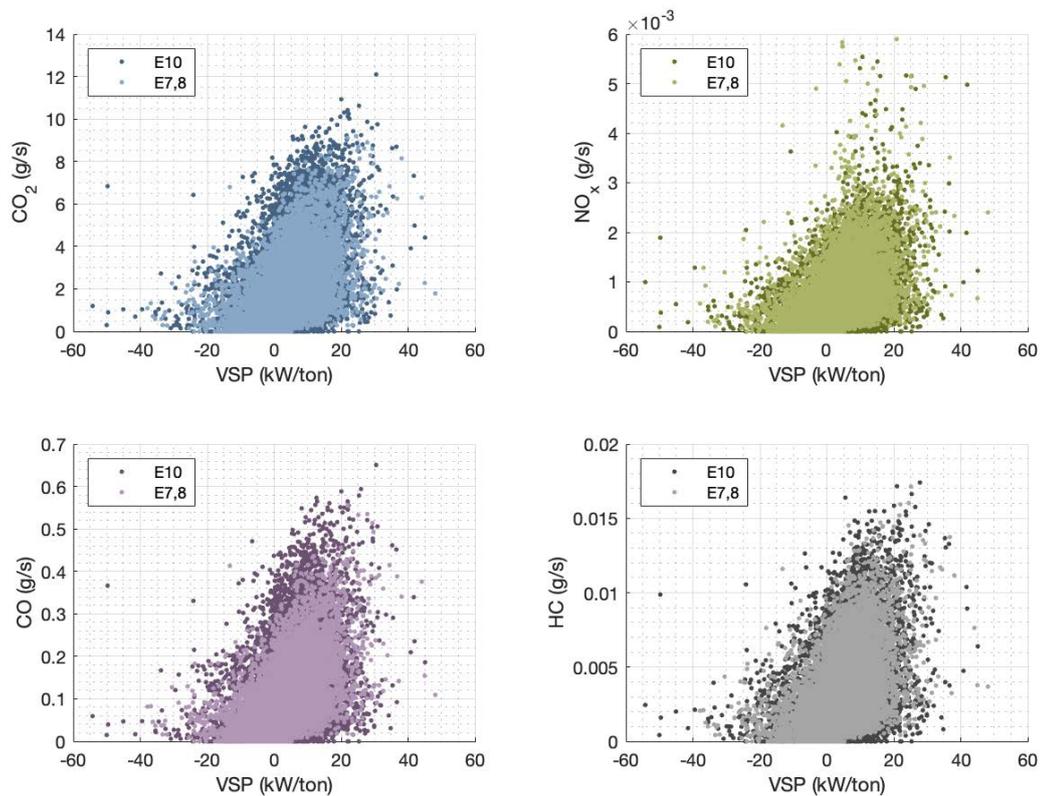


FIGURA 4.14: COMPARACIÓN DE FLUJO MÁSSICO DE EMISIONES VS. VSP (E7.8 vs E10)

Se puede observar que, los valores de flujo mássico son similares en ambos casos, a excepción de el dióxido y monóxido de carbono en el que se aprecia que para valores de VSP cercanos a cero el E10 presenta valores ligeramente mayores de flujo de contaminante.

ANÁLISIS DE DISTRIBUCIÓN

Sin embargo, para poder hacer una mejor comparación entre las emisiones de ambos combustibles se ha decidido analizar para cada bin tres puntos particulares, según el modelo de diagrama de cajas para cada bin que se ha presentado a lo largo del capítulo. Esto, en respuesta a que los modelos de regresión lineal realizados durante el análisis exploratorio no cumplieron con los parámetros necesarios para ser aceptados como representativos de la data.

El análisis de estos tres puntos representa el área en la cual se distribuyen los valores del flujo de emisiones de gases de escape. En cada gráfica, muestran los puntos representativos asociados a cada *bin*, así como una línea de regresión cúbica que permite observar la tendencia global. Cada gráfica presentará tres grupos de curvas:

- × La curva superior correspondiente al valor del Q_3 más $1.5 \cdot IQR$, que es el valor representativo máximo para cada *bin*.
- × La curva del medio corresponde a la media de cada uno de los *bins*.
La curva inferior corresponde al Q_1 (25%). Se seleccionó el Q_1 debido a que, como se puede observar en la Figura 4.14, los valores inferiores del flujo para gran parte de los bins son cercanos a cero, por lo que el valor de Q_1 menos $1.5 \cdot IQR$ carece de sentido.

Dichas gráficas son un punto de entrada al análisis del comportamiento de emisiones con miras al ajuste a través de curvas de los flujos de emisiones.

Asimismo, para poder realizar el análisis del flujo másico de las especies, se debe tener en cuenta también la distribución que tiene el VSP para poder saber en que sección de la curva el vehículo pasa la mayor parte del tiempo y poder comparar. Para esto, se presenta a continuación, los diagramas de caja de cada una de las composiciones de etanol (Figura 4.15).

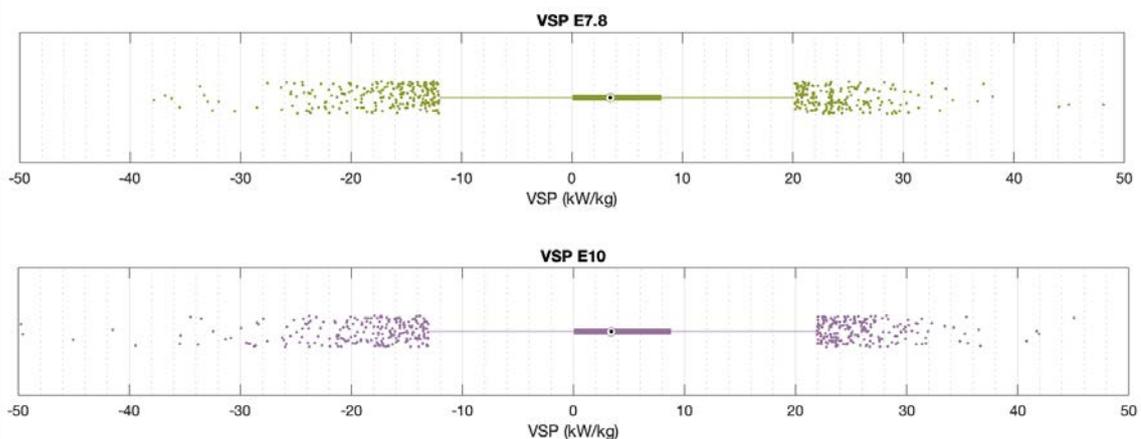


FIGURA 4.15: CUADRO COMPARATIVO VSP E7.8 vs E10

Se observa en la Figura 4.15 que la media de ambas composiciones (representada en el diagrama como un punto negro) tiene un valor similar; sin embargo, en el caso del E10 la extensión entre Q_1 y Q_3 (IQR) es mayor que para el E7.8. Los valores máximos y mínimos antes de ser considerado un *outlier*, también son distintos entre ambas composiciones, teniendo el E10 un rango mayor que va desde -13 kW/ton hasta 22 kW/ton mientras que el E7.8 tiene un rango que va desde -12 kW/ton hasta 22 kW/ton. Las tablas de valores exactos se pueden ver en el análisis realizado al inicio de este capítulo (Tabla 4.1 y Tabla 4.4).

En primer lugar, se presenta la gráfica correspondiente al CO₂ (ver Figura 4.16). En la que se ha graficado en color verde los valores correspondientes a E7.8 y en azul los valores que representan a E10 (ver Figura 4.16).

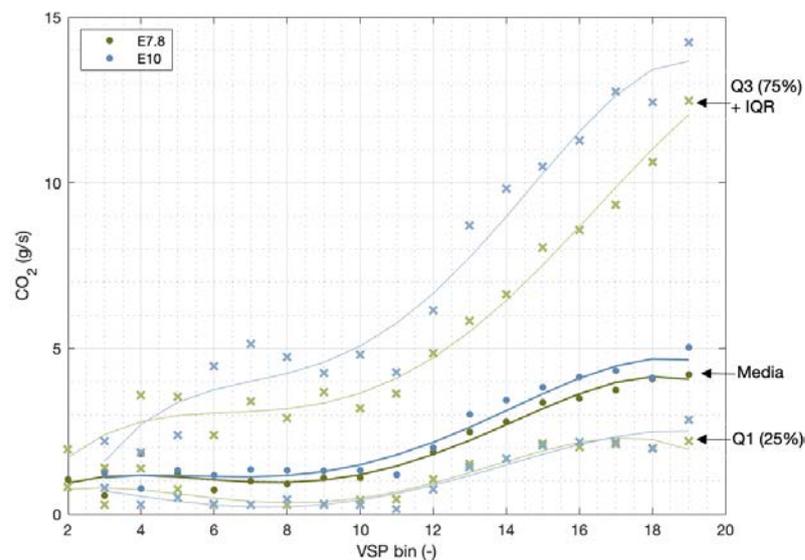


FIGURA 4.16: COMPARACIÓN DE CO₂ VS. VSP POR BIN

En el gráfico se puede observar que para ambas composiciones gasolina – etanol, la media presenta un comportamiento que se ajusta a lo mencionado en los diagramas de cajas para ambas composiciones y los valores del flujo másico del CO₂ se mantienen constantes hasta el punto cercano a cero que corresponde al *bin* 11 cuyos valores límites son -2.9 y 1.2 kW/ton. El mismo comportamiento se aprecia en las líneas inferior y superior. Sin embargo, la línea superior presenta una variación mayor entre el valor en el *bin* 11 y el valor para los bins mayores. Esto quiere decir que el valor del flujo de gases de escape se hace más errático conforme el valor del VSP aumenta. Finalmente, en el caso de la mediana y la línea correspondiente al Q₁ se observa que para valores mayores a 20 el valor del flujo de emisiones se estabiliza; mientras que, para la línea correspondiente a valores máximos la pendiente disminuye.

En cuanto a la diferencia entre ambas composiciones de gasolina-etanol, esta se encuentra principalmente en los valores máximos que se tiene para cada bin del VSP en la línea correspondiente a Q₃ más 1.5·IQR. Donde, el E10 es constantemente mayor, y cuya diferencia se hace mayor conforme el VSP aumenta.

En segundo lugar, se presenta la gráfica correspondiente al CO (ver Figura 4.17)

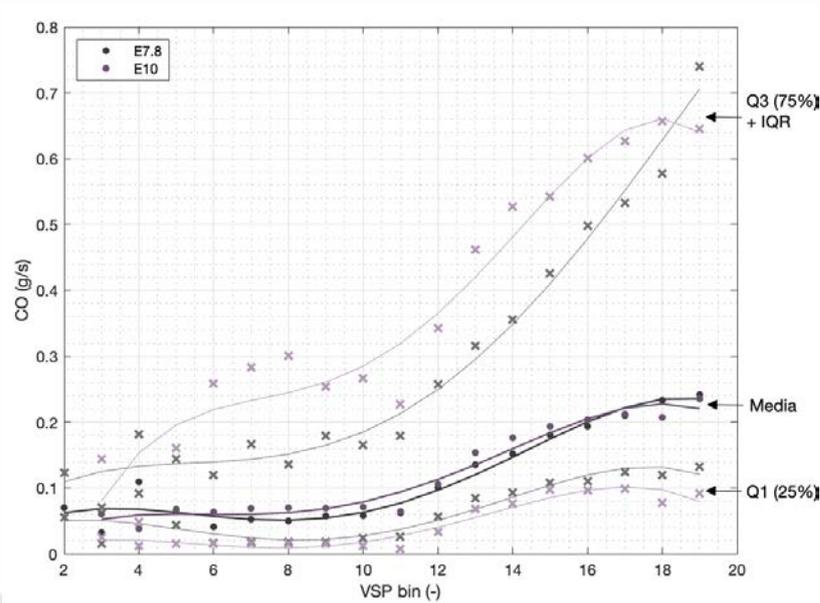


FIGURA 4.17: COMPARACIÓN DE CO VS. VSP POR BIN

En la Figura 4.17 se puede observar una tendencia de comportamiento similar al presentado en el CO₂; los valores menores a cero se mantienen constantes y tienen valores pequeños. Sin embargo, en el caso de las líneas correspondientes a la mediana y Q₁, para el CO los valores de E10 son menores a los de E7.8. Es más, si se observa los valores de las líneas superiores, que es donde se halla la mayor diferencia, esta se mantiene constante conforme varía el VSP y se estabiliza para valores superiores a 30, mientras que la curva de E7.8 alcanza su mayor valor en el último bin.

En seguida, se presenta la gráfica correspondiente a los hidrocarburos (Figura 4.18).

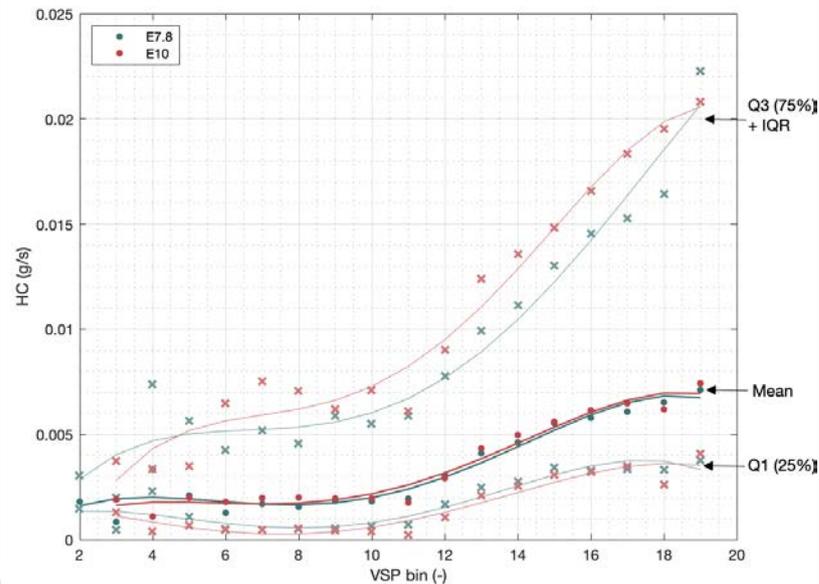


FIGURA 4.18: COMPARACIÓN DE HC VS. VSP POR BIN

En el caso de los HC, el comportamiento es similar al del CO; lo cual, es lógico si se tiene en cuenta lo mencionado en el Capítulo 2: respecto a la relación entre los HC y la formación de CO. Sin embargo, en el caso del HC, lo que se observa es que los valores en todas las curvas son similares para ambas composiciones gasolina-etanol.

Finalmente, se presenta la gráfica correspondiente a los NO_x (ver Figura 4.19) cuyos valores se han mantenido distintos para todas las gráficas elaboradas. Esto, se supone está relacionado con el hecho de que la formación de óxidos de nitrógeno en el motor no está directamente ligado a la combustión; sino, al ambiente que esta genera.

Entonces, en la gráfica se observa que al igual que las especies anteriores, los valores de la mediana y Q₁ no difieren entre composiciones. Sin embargo, en el caso de la curva superior, se observa un cruce cuando el VSP tiene un valor de 20 kW/ton, a partir del cual la curva correspondiente a E10 se estabiliza y se mantiene constantemente debajo de la curva de E7.8. Además, para los valores del VSP menores a -20 kW/ton, se observa en las tres curvas un aumento en el flujo de óxidos de nitrógeno en el caso del E7.8; mientras que, los valores de E10 se mantienen constantes de acuerdo a lo que se viene presentando para las otras especies.

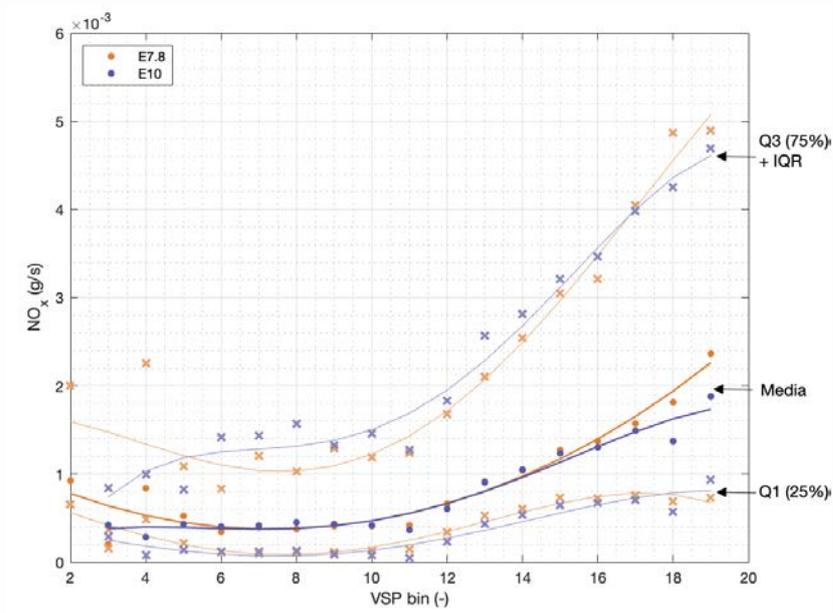


FIGURA 4.19: COMPARACIÓN DE NO_x VS. VSP POR BIN

Para terminar la comparación, y poder ilustrar mejor la diferencia en la dispersión de puntos conforme incrementa el número de bin, se realizó la gráfica de la desviación estándar para cada una de las especies contaminantes (ver Figura 4.20). Esta gráfica muestra la diferencia en la dispersión de cada distribución por bin⁴ y permite comparar este valor entre ambas distribuciones.

⁴ Las distribuciones por bin para los combustibles utilizados se muestran en las figuras Figura 4.5 y Figura 4.11

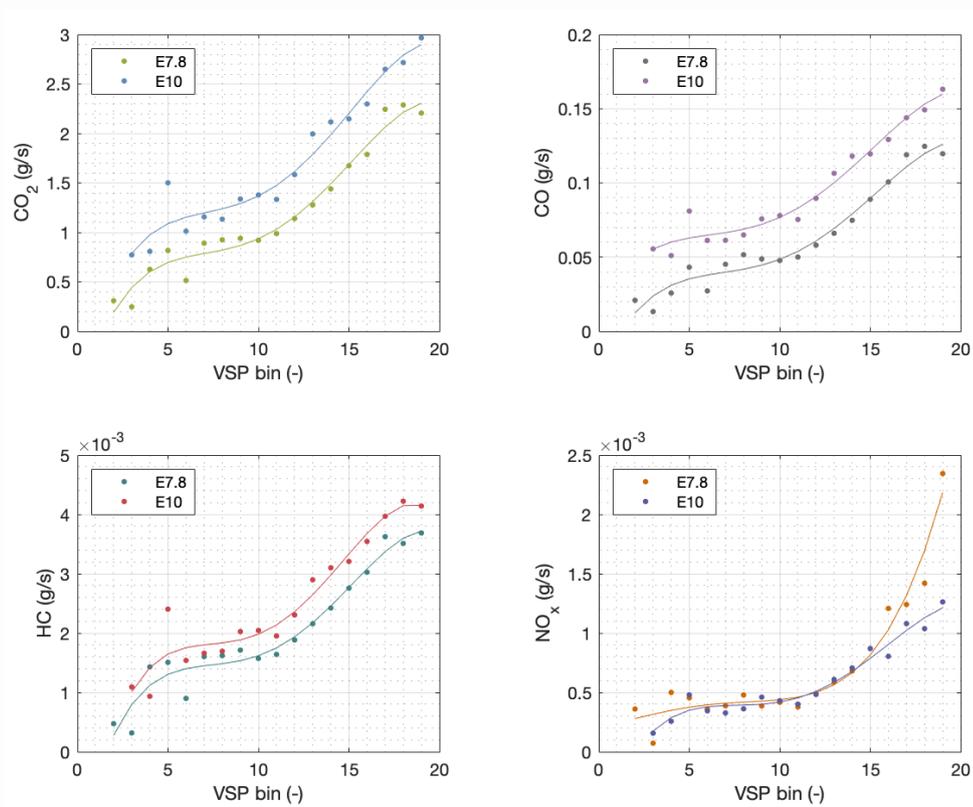


FIGURA 4.20. COMPARACIÓN EN LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR ENTRE E7.8 Y E10 PARA TODO LOS ENSAYOS REALIZADOS

En la figura se puede observar que en el caso del CO₂, CO y HC, la diferencia es consistente a lo largo de la gráfica. Esto significa que, para todos los valores de los *bins* el E10 tiene mayor probabilidad de presentar flujos más altos del contaminante. Por otro lado, en el caso del NO_x, el comportamiento es similar entre ambos combustibles, lo que se puede comprobar por la cercanía en las curvas mostradas en la Figura 4.19.

CONCLUSIONES

A partir del trabajo realizado se puede concluir que es posible realizar un estudio que describa el comportamiento de la emisión de contaminantes de un vehículo que circula en Lima Metropolitana. Esto como respuesta a la necesidad de mejorar el control de la calidad de aire en la ciudad; lo cual, como se ha visto al inicio del presente trabajo, está ligado a las emisiones del parque automotor, como principal contribuyente. Asimismo, otro punto a partir del cual se puede abordar el tema es el efecto del combustible utilizado; por lo cual, se decide evaluar dos composiciones gasolina-etanol: E7.8 y E10.

Por otro lado, para poder realizar un inventario adecuado de las emisiones y poder hacer una proyección, se debe aplicar un modelo en el que se vea reflejada la realidad de los datos que representa. Para esto se evaluó la utilización del VSP, el cual es un parámetro que reúne los principales datos cinemáticos del vehículo y los relaciona con las emisiones vehiculares. Además, este parámetro permite realizar la comparación entre distintos conjuntos de datos, y a partir de lo presentado en este trabajo, también permite realizar una comparación entre las dos composiciones de gasolina-etanol utilizadas.

Entonces, por el lado de la evaluación cinemática del vehículo ensayado, se ha confirmado que en condiciones de tránsito, la ciudad de Lima tiene un tráfico irregular que se ve reflejado en la distribución de valores del VSP en el caso de ambas composiciones gasolina-etanol. Ambas distribuciones corresponden a una t-Student cuyas medias y medianas son cercanas a cero (3.9 y 3.46 kW/ton en el caso del E7.8, y 4.2 y 3.4 kW/ton en el caso del E10, respectivamente); luego, los rangos representativos son de 32.25 kW/ton en el caso del E7.8 y de 33.9 kW/ton en el caso del E10 y las desviaciones estándar son de 7.01 kW/ton para el E7.8 y 7.79 en el caso del E10. Esto indica una alta concentración de datos alrededor de las medidas de tendencia central (media y mediana); lo cual, en el contexto del comportamiento cinemático del vehículo ensayado implica que este pasa la mayor parte del tiempo a baja velocidad y frena constantemente.

Dicho comportamiento fue confirmado a partir de las gráficas de velocidad, aceleración y VSP en el tiempo (similares a la Figura 3.5). Entonces, teniendo en cuenta la distribución del VSP mencionada, en conjunto con la irregularidad en la composición del

parque automotor, se puede establecer a Lima como una ciudad con características de tránsito irregular y así confirmar la necesidad del uso de una metodología de medición de emisiones que considere parámetros como el VSP.

En cuanto a la relación del VSP con parámetros asociados a las emisiones, se observó que la concentración de gases de escape no presenta ninguna relación con el VSP. En las gráficas realizadas se aprecia simetría; sin embargo no hay una tendencia determinada. Por este motivo, y a partir de lo consultado en la bibliografía, se decidió utilizar los flujo de cada uno de los contaminantes como parámetros de comparación.

Entonces, al realizar las gráficas de relación entre flujo y el VSP, si se encontró una tendencia establecida similar a la mencionada en la literatura, con tres rangos de comportamiento distintos. El primer rango corresponde a valores de VSP menores a la media, y se observan emisiones con flujos cercanos a cero. En el segundo grupo se observa una tendencia de crecimiento lineal en las emisiones hasta que el VSP toma valores cercanos a 20 kW/ton. Finalmente en el último rango los valores del flujo de emisión se estabilizan.

Asimismo, se observó el cambio en la distribución del flujo de emisiones conforme varía el VSP, lo cual permitió obtener una mejor visión de la relación entre los dos parámetros. Y, al igual que en el párrafo anterior se observaron tres grupos. En el primer y tercer grupo, las distribuciones no presentaron una forma estable, lo cual puede ser atribuido a la cantidad de puntos en esas partes de la distribución (dichos valores del VSP se encuentran en las colas de la t-Student). En cuanto al segundo grupo, se apreció una distribución marcada con la mayor cantidad de valores concentrada en la parte izquierda de la distribución. Esto se aprecia con mayor claridad en la gráficas de comparación entre composiciones gasolina-etanol, donde las líneas correspondientes a la media se encuentran en la parte baja de la gráfica.

Luego, en cuanto a la comparación entre composiciones de combustible (E7.8 vs E10), se llega a la conclusión de que no existe una diferencia significativa entre los flujos máxicos de las especies contaminantes analizadas. Esto se basa en que, para el conjunto de valores mencionado en el párrafo anterior, las medidas de tendencia central tienen valores similares para ambas composiciones. Un comportamiento similar se observó durante la comparación entre concentración de emisiones y VSP al encontrar una amplia

superposición entre las gráficas. Sin embargo, la diferencia en el caso de los flujos máxicos se encuentra en el rango superior de valores (curva correspondiente a $Q_3 + 1.5 \cdot IQR$), y también en la desviación estándar. En el caso del E10, este presenta una mayor dispersión en la distribución de los flujos máxicos, lo cual se ve reflejado en el hecho de que los puntos de la curva $Q_3 + 1.5 \cdot IQR$ se encuentran por encima de los puntos correspondientes al E7.8. Esto significa que cuando el vehículo ensayado opera con E10, para todas las velocidades existe una mayor probabilidad de que el flujo de emisiones sea mayor a que si se utilizara E7.8.

Finalmente, esto quiere decir que, si bien el VSP es un parámetro que toma en cuenta tanto valores cinemáticos como características del vehículo y las condiciones de manejo, existen otros factores que pueden afectar la relación entre dichos valores y las emisiones. Algunos ejemplos son los factores asociados a la combustión, así como la existencia del sistema de post-tratamiento de gases de escape, el estado del vehículo y las incertidumbres experimentales asociadas a los equipos de medición. Asimismo, se debe tener en cuenta las limitaciones intrínsecas del parámetro VSP, de acuerdo a lo mostrado en la literatura, así como el alcance de su uso.

RECOMENDACIONES

Ampliar los estudios de emisiones y realizar pruebas en otros vehículos y rutas, de modo que se pueda establecer un escenario más completo del tránsito en Lima, así como las emisiones vehiculares que resultan. Asimismo, como resultado de dichas pruebas, se recomienda la elaboración de un ciclo de conducción representativo a partir del cual se pueda probar los vehículos importados al país y así poder respetar los límites establecidos por la legislación.

Continuar estudios de flujos de emisiones vehiculares para distintas composiciones de la mezcla gasolina-etanol. Si bien, estudios apuntan a la reducción de la concentración de emisiones conforme se aumenta el porcentaje de etanol en las mezclas gasolina-etanol, también se ha establecido el incremento en el consumo de combustible en dichas condiciones; lo cual, se traduce en el incremento del flujo de emisiones. Lo que quiere decir que, se requiere de más pruebas para confirmar si el incremento sustancial del etanol reduce efectivamente las emisiones vehiculares (E15 y E20). Sin embargo, se debe tener en cuenta que el uso de un mayor porcentaje de etanol podría requerir de modificaciones en el sistema de inyección del motor.

Continuar el análisis de la relación entre las condiciones operacionales del vehículo y sus emisiones. Una forma de hacer esto es a través de técnicas como *Machine Learning* y *Deep Learning*; sin embargo, se debe tener en cuenta que el enfoque de estas técnicas es distinto al utilizado en este trabajo. Estas tienen un objetivo más predictivo que de análisis de los parámetros que afectan las emisiones; este último puede ser realizado también a través de un Análisis de Componentes Principales. Otra alternativa puede ser una combinación de ambos enfoques para observar cual es la influencia de los distintos parámetros en el resultado. Asimismo, se puede también hacer una comparación entre los resultados obtenidos con el VSP y estas técnicas computacionales.

BIBLIOGRAFÍA

- Aakko-Saksa, P., Rantanen-Kolehmainen, L., Koponen, P., Engman, A., & Kihlman, J. (2011). Biogasoline Options - Possibilities for Achieving High Bio-share and Compatibility with Conventional Cars. *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*, 4(2), 298–317. <https://doi.org/10.4271/2011-24-0111>
- ACEA, Auto Alliance, AMA, & JAMA. (2013). Worldwide Fuel Charter. *Fuel*, (September), 78.
- Aliaga, R. A. (2016). Evaluación comparativa del consumo de combustible e índice de emisiones de un vehículo liviano funcionando con dos mezclas de gasolina y etanol (E7.8 y E10) en Lima Metropolitana. Recuperado de <http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/123456789/7368>
- Automobile Catalog. (2010). 2010 Hyundai Santa Fe 2.4 4WD Comfort. Recuperado el 26 de noviembre del 2019, de https://www.automobilecatalog.com/car/2010/1177415/hyundai_santa_fe_2_4_4wd_comfort.html
- Barakat, Y., Awad, E. N., & Ibrahim, V. (2016). Fuel consumption of gasoline ethanol blends at different engine rotational speeds. *Egyptian Journal of Petroleum*, 25(3), 309–315. <https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2015.07.019>
- CIAAW. (n.d.). Standard Atomic Weights.
- Cóndor, J. (2019). Parque automotor se renueva en 6 % al año, cuando debería hacerlo en 10 %. Recuperado de Diario Gestión website: <https://gestion.pe/economia/parque-automotor-renueva-6-ano-deberia-hacerlo-10-261551-noticia/>
- Corvalán, R. M., Osses, M., Urrutia, C. M., & González, P. A. (2005). Estimating traffic emissions using demographic and socio-economic variables in 18 Chilean urban areas. *Population and Environment*, 27(1), 63–87. <https://doi.org/10.1007/s11111-005-0011-0>
- Da Silva, R., De Menezes, E. W., & Cataluña, R. (2008). Rendimento térmico e emissões de contaminantes atmosféricos de gasolinas formuladas com etanol, MTBE e TAEE. *Quimica Nova*, 31(5), 980–984. <https://doi.org/10.1590/s0100-40422008000500007>
- Davis, N., Lents, J., Osses, M., Nikkila, N., & Barth, M. (2005). Development and

- application of an international vehicle emissions model. *Transportation Research Record*, (1939), 157–165. <https://doi.org/10.3141/1939-18>
- Dawidowski, L., Sánchez-Ccoyllo, O., & Alarcón, N. (2014). *Estimación de emisiones vehiculares en Lima Metropolitana*. 46. Recuperado de <http://www.senamhi.gob.pe>
- De Veaux, R., Velleman, P., & Bock, D. (2012). Intro Stats. In *Journal of Chemical Information and Modeling* (3rd ed.). Boston: Pearson Education, Inc.
- Diario Oficial El Peruano. (2019). Renovación del parque automotor. Recuperado el 23 de setiembre del 2019, de Diario Oficial El Peruano website: <https://elperuano.pe/noticia-renovacion-del-parque-automotor-82422.aspx>
- Ericsson, E. (2001). Independent driving pattern factors and their influence on fuel-use and exhaust emission factors. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 6(5), 325–345. [https://doi.org/10.1016/S1361-9209\(01\)00003-7](https://doi.org/10.1016/S1361-9209(01)00003-7)
- Ferguson, C. R., & Kirkpatrick, A. T. (2016). *Internal Combustion Engines* (2nd ed.). Sussex: John Wiley & Sons, Ltd.
- Geetha, A., & Subramani, C. (2019). Development of driving cycle under real world traffic conditions: A case study. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 9(6), 4798–4803. <https://doi.org/10.11591/ijece.v9i6.pp4798-4803>
- Hernández, M., Menchaca, L., & Mendoza, A. (2014). Fuel economy and emissions of light-duty vehicles fueled with ethanol-gasoline blends in a Mexican City. *Renewable Energy*, 72, 236–242. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.07.018>
- Heywood, J. B. (2018). *Internal Combustion Engine Fundamentals* (A. Duffy & J. M. Morris, Eds.). McGraw-Hill, Inc.
- Hu, J., Wu, Y., Wang, Z., Li, Z., Zhou, Y., Wang, H., ... Hao, J. (2012). Real-world fuel efficiency and exhaust emissions of light-duty diesel vehicles and their correlation with road conditions. *Journal of Environmental Sciences*, 24(5), 865–874. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(11\)60878-4](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(11)60878-4)
- INEI. (2012). *Dirección y velocidad anual del viento según departamento, 1998-2012*.
- Infrared Industries. (2018). *FGA4500 User's Manual* (pp. 1–72). pp. 1–72. Hayward.
- IVE. (2008). *IVE Model User's Manual* (p. 54). p. 54.
- Jaikumar, R., Shiva Nagendra, S. M., & Sivanandan, R. (2017). Modeling of real time

- exhaust emissions of passenger cars under heterogeneous traffic conditions. *Atmospheric Pollution Research*, 8(1), 80–88.
<https://doi.org/10.1016/j.apr.2016.07.011>
- Jiménez-Palacios, J. L. (1999). *Understanding and quantifying motor vehicle emissions with vehicle specific power and tunable infrared laser differential absorption spectrometer remote sensing*.
- Kuranc, A. (2015). Exhaust emission test performance with the use of the signal from air flow meter. Eksploatacyjne badania emisji spalin z wykorzystaniem sygnału z przepływomierz. *Maintenance and Reliability*, 17(1), 129–134.
<https://doi.org/10.17531/ein.2015.1.17>
- Latam Autos. (10 de Diciembre de 2017). *¿Cuál es el momento correcto para hacer los cambios de velocidad?* Recuperado el Julio de 2020, de TodoAutos: <http://www.todoautos.com.pe/portal/autos/200-especiales/9232-cambios-velocidad-marcha-momento-correcto>
- Mathworks. (2019). Interpolation methods. Recuperado el 1 de diciembre del 2019, de MatLab 2019b Documentation website:
<https://www.mathworks.com/help/curvefit/interpolation-methods.html>
- Ministerio del Ambiente. *DECRETO SUPREMO N° 009-2012-MINAM.*, (2012).
- Ministerio del Ambiente. (2014). *Informe nacional de la calidad del aire 2013-2014*. Recuperado de <https://www.gob.pe/institucion/minam/informes-publicaciones/2635-informe-nacional-de-la-calidad-del-aire-2013-2014>
- Nesamani, K. S., Saphores, J. D., McNally, M. G., & Jayakrishnan, R. (2017). Estimating impacts of emission specific characteristics on vehicle operation for quantifying air pollutant emissions and energy use. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 4(3), 215–229.
<https://doi.org/10.1016/j.jtte.2017.05.007>
- Osinermin. (2017). *La industria de los hidrocarburos líquidos en el Perú* (1st ed.). Recuperado de http://www.osinermin.gob.pe/seccion/centro_documental/Institucional/Estudios_Economicos/Libros/Libro-industria-hidrocarburos-liquidos-Peru.pdf
- Osinermin. (2018). Importación de petróleo y productos derivados. Recuperado el 29 de

- Octubre del 2019, del Observatorio Energético Minero website:
<http://observatorio.osinergmin.gob.pe/importacion-petroleo-derivados>
- Payri, F., & Desantes, J. M. (2011). *Motores de combustión interna alternativos*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Reijnders, L., & Huijbregts, M. (2009). Biofuels for Road Transport. In *Green Energy and Technology*. <https://doi.org/10.1007/978-1-84882-138-5>
- Rodríguez, R. A., Virguez, E. A., Rodríguez, P. A., & Behrentz, E. (2016). Influence of driving patterns on vehicle emissions: A case study for Latin American cities. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 43, 192–206. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2015.12.008>
- Schirmer, W. N., Olanyk, L. Z., Guedes, C. L. B., Quessada, T. P., Ribeiro, C. B., & Capanema, M. A. (2017). Effects of air/fuel ratio on gas emissions in a small spark-ignited non-road engine operating with different gasoline/ethanol blends. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(25), 20354–20359. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9651-8>
- SENAMHI. (2019). Monitoreo de la calidad del aire para Lima Metropolitana.
- Seo, S. (2006). A review and comparison of methods for detecting outliers in univariate data sets. *Department of Biostatistics, Graduate School of Public Health*, 1–53. Recuperado de <http://d-scholarship.pitt.edu/7948/>
- Tipian, G. (2015). Análisis experimental del uso de mezclas etanol - gasolina en motores de encendido por chispa. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Tong, H. Y., & Hung, W. T. (2010). A framework for developing driving cycles with on-road driving data. *Transport Reviews*, 30(5), 589–615. <https://doi.org/10.1080/01441640903286134>
- World Health Organization. (2005). *WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide*. Recuperado de https://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/outdoorair_aqg/en
- Zhai, H., Frey, H. C., & Roupail, N. M. (2008). A Vehicle-Specific Power Approach to Speed- and Facility-Specific Emissions Estimates for Diesel Transit Buses. *Environmental Science & Technology*, 42(21), 7985–7991. <https://doi.org/10.1021/es800208d>

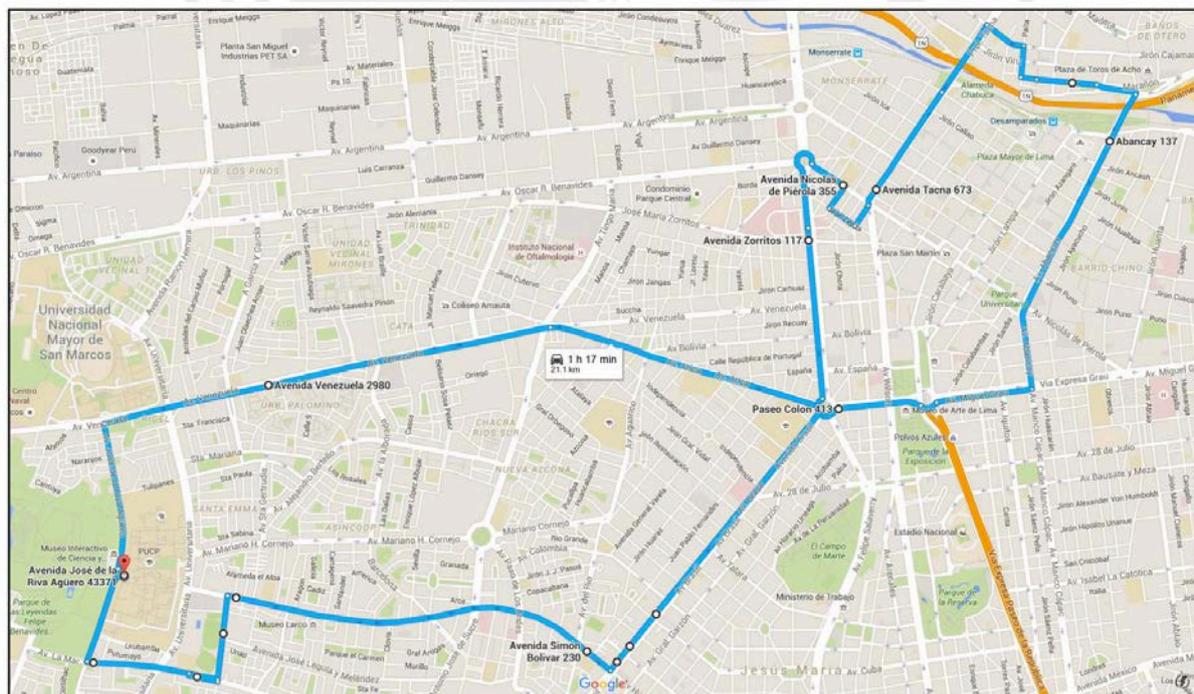
ANEXO 1: Datos del experimento realizado por Aliaga (2016)

Todos los datos fueron tomados directamente de la fuente.

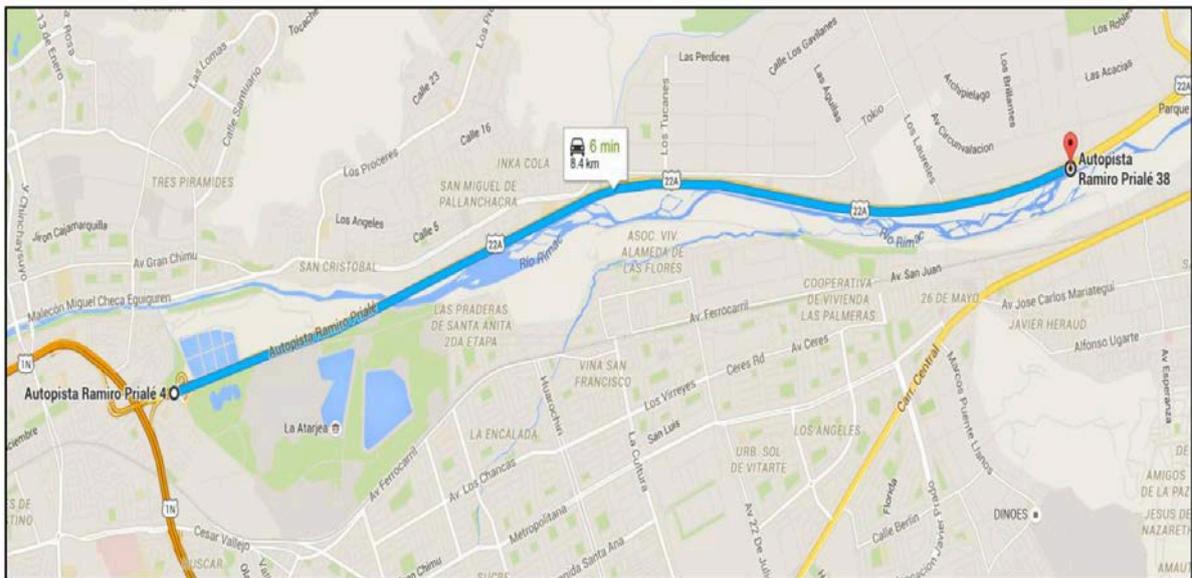
DATOS DEL VEHÍCULO

HYUNDAI SANTA FE 2010		
Parámetros	Unidad	Valor
N° Cilindros	Un.	4
Volumen	L	2,349
Potencia máx.	HP	174
Velocidad a Potencia máx.	r.p.m.	6000
Torque máx.	N.m	226
Velocidad a Torque máx.	r.p.m.	3750
Peso bruto	kg	2505
Peso neto	kg	1680
Carga útil	kg	825
Año de fabricación	año	2010
Año del modelo	año	2011

ruta de conducción en condiciones de tráfico



RUTA DE CONDUCCIÓN A VELOCIDAD CONSTANTE



ANEXO 2: Tablas de resultados obtenidos para la composición
gasolina – etanol al 7,8%

CO₂

Bin	Mean	Median	Std	Q1	Q3	MC	IQR	Min	Max
2	1.0442	1.0910	0.3082	0.8092	1.2675	-0.1149	0.4583	0.1217	1.9550
3	0.5653	0.5846	0.2459	0.2962	0.7403	0.0000	0.4441	-0.3699	1.4065
4	1.8217	1.8217	0.6252	1.3796	2.2637	0.0000	0.8841	0.0534	3.5900
5	1.2449	1.2168	0.8166	0.7546	1.8677	-0.0557	1.1131	-0.9150	3.5373
6	0.7316	0.7406	0.5132	0.2930	1.1284	-0.0371	0.8354	-0.9600	2.3815
7	0.9936	0.7958	0.8905	0.2984	1.5398	0.2021	1.2414	-1.5638	3.4020
8	0.9112	0.7139	0.9243	0.2923	1.3335	0.1642	1.0413	-1.2696	2.8954
9	1.0901	0.7800	0.9389	0.3022	1.6539	0.3987	1.3517	-1.7254	3.6815
10	1.0977	0.9015	0.9189	0.4365	1.5421	0.1956	1.1056	-1.2218	3.2005
11	1.1845	0.9289	0.9872	0.4435	1.7245	0.2877	1.2811	-1.4781	3.6461
12	1.8709	1.6887	1.1389	1.0418	2.5656	0.1581	1.5238	-1.2439	4.8513
13	2.4798	2.3057	1.2768	1.5187	3.2413	0.1259	1.7226	-1.0653	5.8253
14	2.7900	2.6216	1.4384	1.6786	3.6622	0.0884	1.9836	-1.2968	6.6376
15	3.3684	3.1723	1.6737	2.1246	4.4952	0.1033	2.3707	-1.4314	8.0513
16	3.4934	3.3031	1.7876	2.0192	4.6390	0.1034	2.6198	-1.9104	8.5687
17	3.7393	3.2043	2.2445	2.1102	5.0045	0.2693	2.8942	-2.2311	9.3458
18	4.0768	3.7836	2.2876	2.0056	5.4527	0.0533	3.4471	-3.1651	10.6234
19	4.2102	3.9078	2.2057	2.1928	6.3038	0.1472	4.1110	-3.9737	12.4703

CO

Bin	Mean	Median	Std	Q1	Q3	MC	IQR	Min	Max
2	0.0703	0.0818	0.0208	0.0551	0.0825	-0.4721	0.0274	0.0139	0.1237
3	0.0323	0.0374	0.0132	0.0163	0.0382	-0.3062	0.0218	-0.0164	0.0709
4	0.1093	0.1093	0.0257	0.0911	0.1275	0.0000	0.0364	0.0366	0.1821
5	0.0672	0.0577	0.0431	0.0437	0.0840	0.3522	0.0403	-0.0166	0.1444
6	0.0412	0.0461	0.0272	0.0172	0.0581	-0.3452	0.0410	-0.0443	0.1196
7	0.0525	0.0539	0.0451	0.0184	0.0774	-0.2238	0.0590	-0.0701	0.1659
8	0.0500	0.0377	0.0516	0.0182	0.0652	0.2372	0.0470	-0.0524	0.1358
9	0.0577	0.0467	0.0487	0.0184	0.0830	0.2205	0.0646	-0.0784	0.1798
10	0.0582	0.0496	0.0477	0.0243	0.0807	0.1460	0.0565	-0.0604	0.1654
11	0.0624	0.0542	0.0500	0.0268	0.0877	0.1199	0.0609	-0.0645	0.1791
12	0.1005	0.0913	0.0580	0.0570	0.1372	0.1656	0.0802	-0.0634	0.2576
13	0.1354	0.1278	0.0660	0.0848	0.1774	0.1008	0.0926	-0.0541	0.3162
14	0.1520	0.1428	0.0747	0.0931	0.1981	0.1068	0.1050	-0.0644	0.3557
15	0.1807	0.1706	0.0889	0.1083	0.2352	0.0930	0.1269	-0.0821	0.4255
16	0.1938	0.1751	0.1006	0.1103	0.2656	0.2049	0.1553	-0.1228	0.4986
17	0.2103	0.1919	0.1189	0.1248	0.2879	0.1555	0.1631	-0.1198	0.5326
18	0.2333	0.2258	0.1247	0.1194	0.3026	-0.0217	0.1832	-0.1554	0.5774
19	0.2418	0.2162	0.1196	0.1330	0.3758	0.2770	0.2428	-0.2311	0.7400

HC

Bin	Mean	Median	Std	Q1	Q3	MC	IQR	Min	Max
2	0.0018	0.0021	0.0005	0.0015	0.0021	-0.4532	0.0006	0.0005	0.0030
3	0.0008	0.0010	0.0003	0.0005	0.0011	-0.5922	0.0006	-0.0005	0.0020
4	0.0033	0.0033	0.0014	0.0023	0.0044	0.0000	0.0020	-0.0007	0.0074

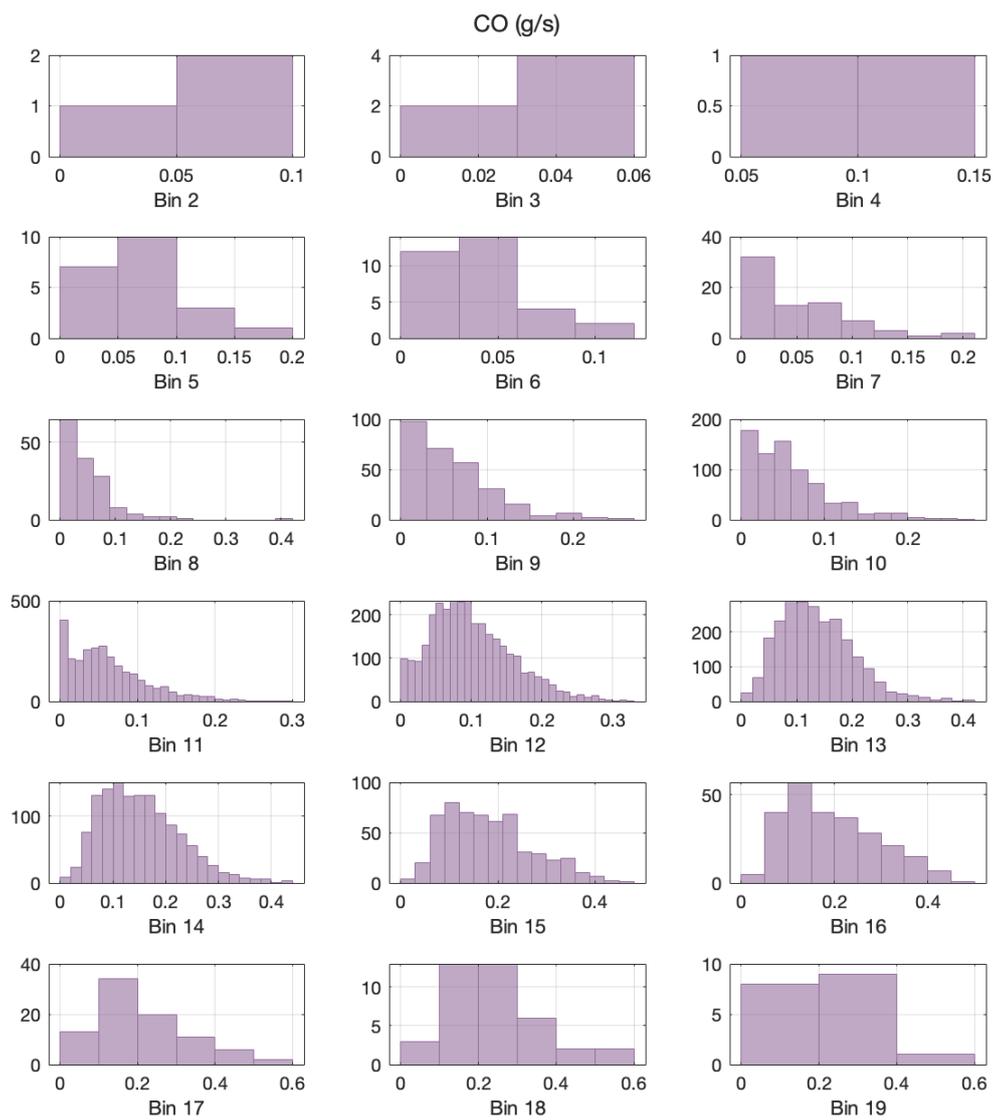
5	0.0021	0.0017	0.0015	0.0011	0.0029	0.3590	0.0018	-0.0016	0.0056
6	0.0013	0.0013	0.0009	0.0005	0.0020	-0.1476	0.0015	-0.0018	0.0043
7	0.0017	0.0013	0.0016	0.0005	0.0024	0.1910	0.0019	-0.0023	0.0052
8	0.0016	0.0012	0.0016	0.0005	0.0021	0.2315	0.0016	-0.0020	0.0046
9	0.0019	0.0015	0.0017	0.0005	0.0027	0.1741	0.0021	-0.0027	0.0059
10	0.0018	0.0014	0.0016	0.0006	0.0026	0.2577	0.0019	-0.0023	0.0055
11	0.0020	0.0016	0.0016	0.0007	0.0028	0.1985	0.0021	-0.0024	0.0059
12	0.0031	0.0028	0.0019	0.0017	0.0041	0.1297	0.0024	-0.0019	0.0078
13	0.0041	0.0038	0.0022	0.0025	0.0055	0.1409	0.0030	-0.0020	0.0099
14	0.0046	0.0043	0.0024	0.0028	0.0061	0.1171	0.0033	-0.0022	0.0111
15	0.0055	0.0052	0.0028	0.0034	0.0073	0.0908	0.0038	-0.0023	0.0130
16	0.0058	0.0055	0.0030	0.0033	0.0078	0.1087	0.0045	-0.0035	0.0146
17	0.0061	0.0054	0.0036	0.0034	0.0081	0.1557	0.0048	-0.0038	0.0153
18	0.0065	0.0064	0.0035	0.0033	0.0086	0.0033	0.0052	-0.0045	0.0164
19	0.0071	0.0068	0.0037	0.0038	0.0112	0.1478	0.0074	-0.0073	0.0223

NO_x

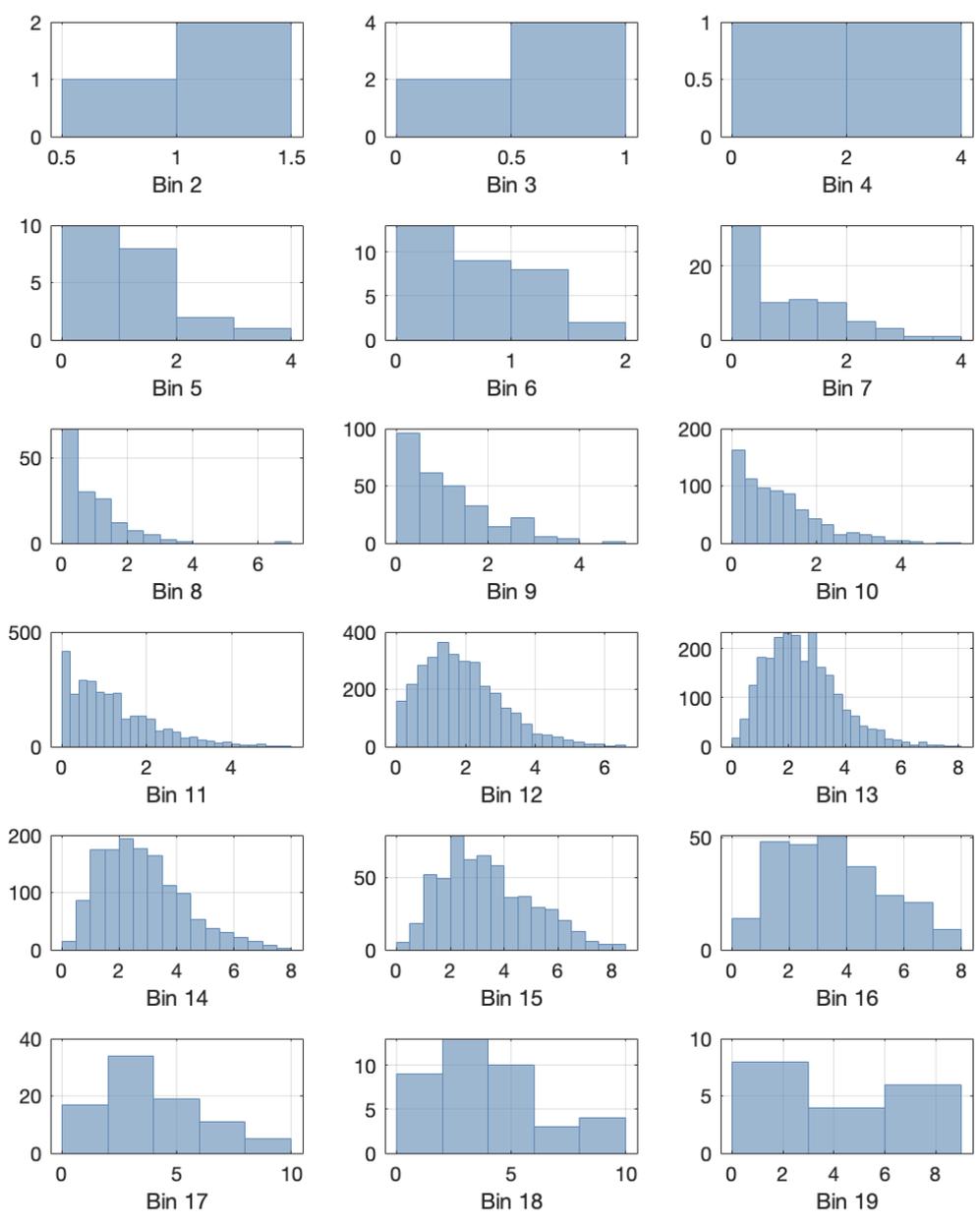
Bin	Mean	Median	Std	Q1	Q3	MC	IQR	Min	Max
2	0.0009	0.0009	0.0004	0.0007	0.0012	-0.0002	0.0005	-0.0002	0.0020
3	0.0002	0.0002	0.0001	0.0002	0.0002	0.0000	0.0001	0.0000	0.0004
4	0.0008	0.0008	0.0005	0.0005	0.0012	0.0000	0.0007	-0.0006	0.0023
5	0.0005	0.0004	0.0005	0.0002	0.0006	-0.1030	0.0003	-0.0003	0.0011
6	0.0003	0.0003	0.0004	0.0001	0.0004	-0.0494	0.0003	-0.0003	0.0008
7	0.0004	0.0003	0.0004	0.0001	0.0005	0.1464	0.0004	-0.0006	0.0012
8	0.0004	0.0003	0.0005	0.0001	0.0005	0.2487	0.0004	-0.0004	0.0010
9	0.0004	0.0003	0.0004	0.0001	0.0006	0.2401	0.0005	-0.0006	0.0013

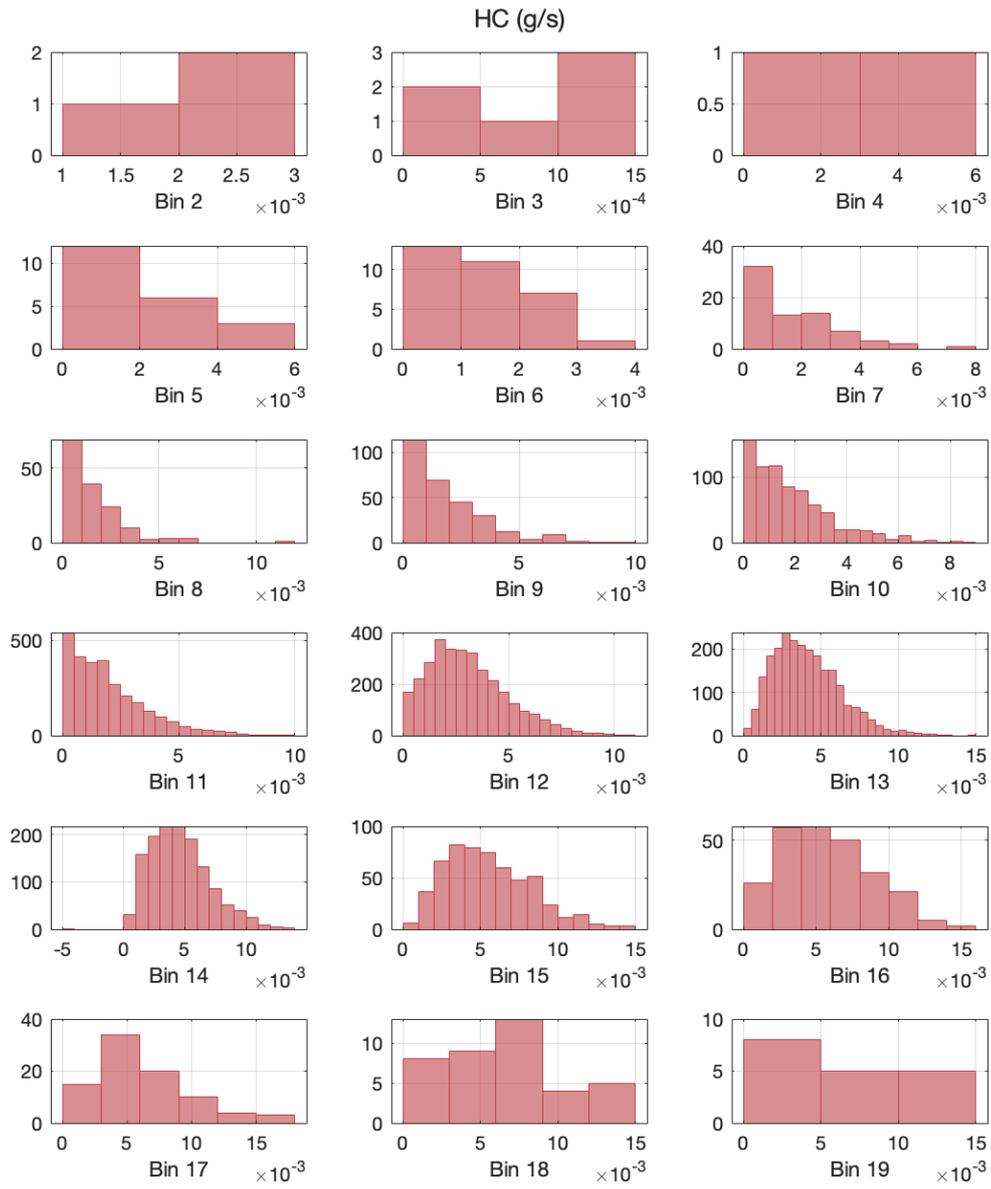
10	0.0004	0.0003	0.0004	0.0001	0.0006	0.2026	0.0004	-0.0005	0.0012
11	0.0004	0.0003	0.0004	0.0001	0.0006	0.2260	0.0004	-0.0005	0.0012
12	0.0007	0.0006	0.0005	0.0003	0.0009	0.1581	0.0005	-0.0005	0.0017
13	0.0009	0.0008	0.0006	0.0005	0.0012	0.2026	0.0006	-0.0004	0.0021
14	0.0010	0.0009	0.0007	0.0006	0.0014	0.1340	0.0008	-0.0006	0.0025
15	0.0013	0.0011	0.0009	0.0007	0.0017	0.2218	0.0009	-0.0007	0.0030
16	0.0014	0.0012	0.0012	0.0007	0.0017	0.1077	0.0010	-0.0008	0.0032
17	0.0016	0.0013	0.0012	0.0008	0.0021	0.2510	0.0013	-0.0012	0.0041
18	0.0018	0.0015	0.0014	0.0007	0.0024	0.1013	0.0017	-0.0018	0.0049
19	0.0024	0.0019	0.0023	0.0007	0.0024	-0.0981	0.0017	-0.0018	0.0049

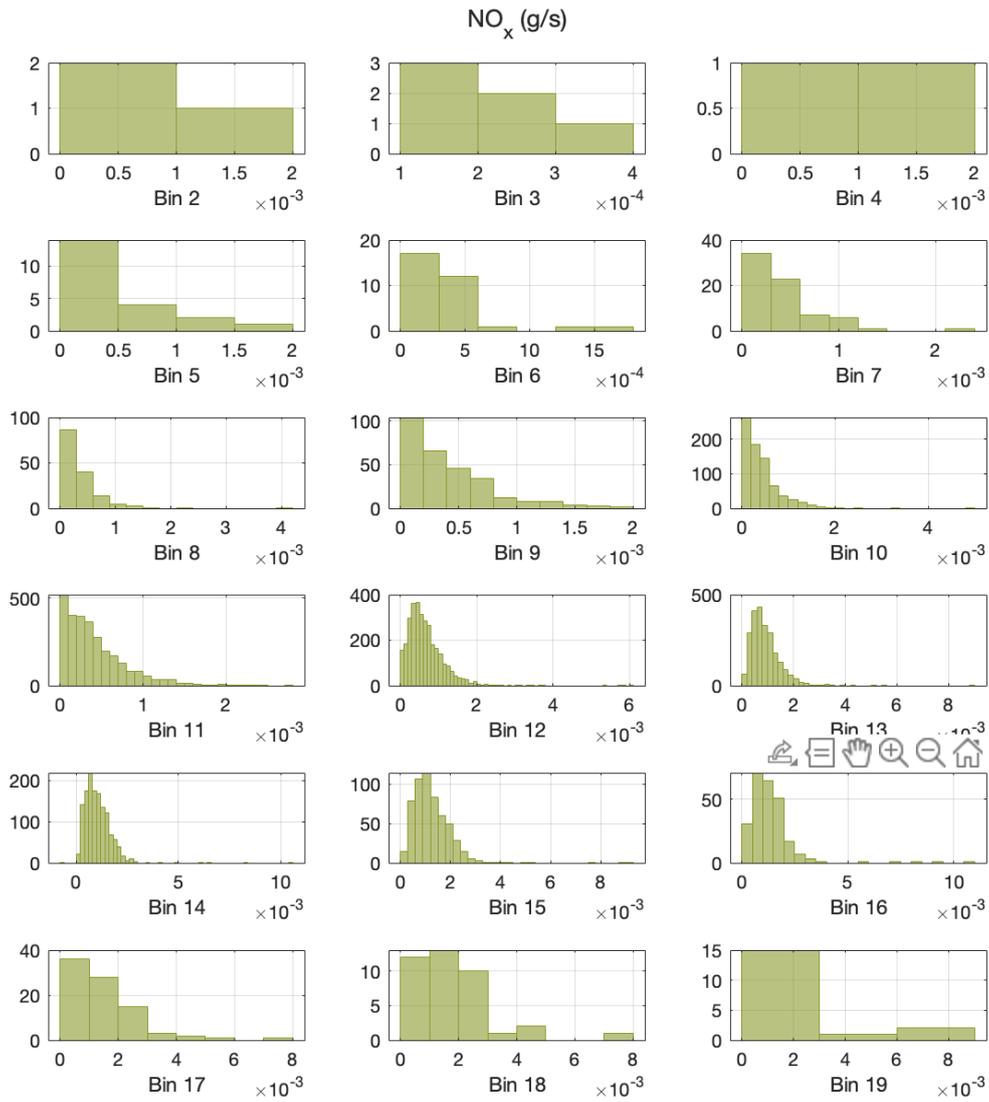
ANEXO 3: Gráficas de distribución por *bin* para la composición gasolina – etanol al 7,8%



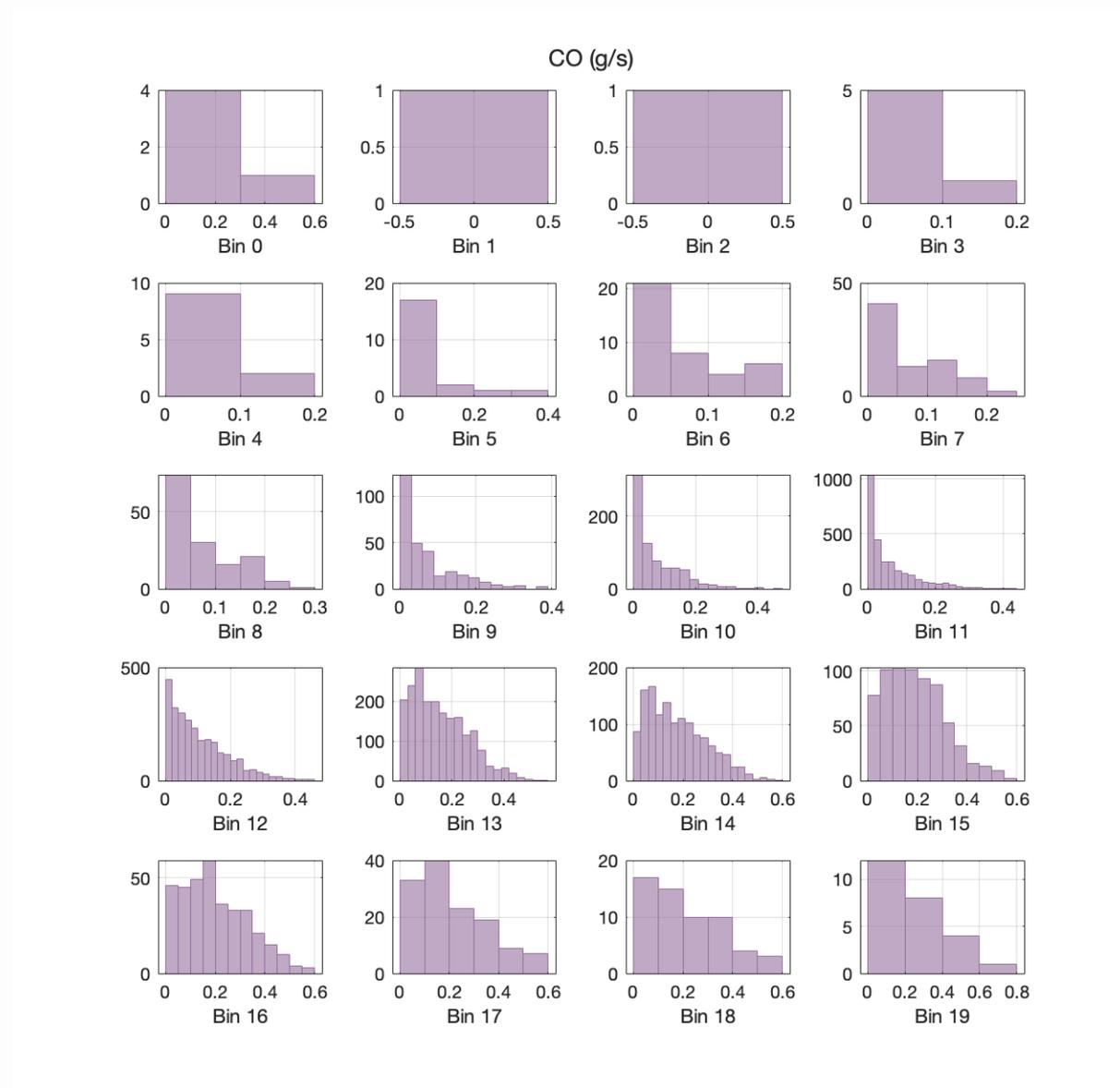
CO₂ (g/s)



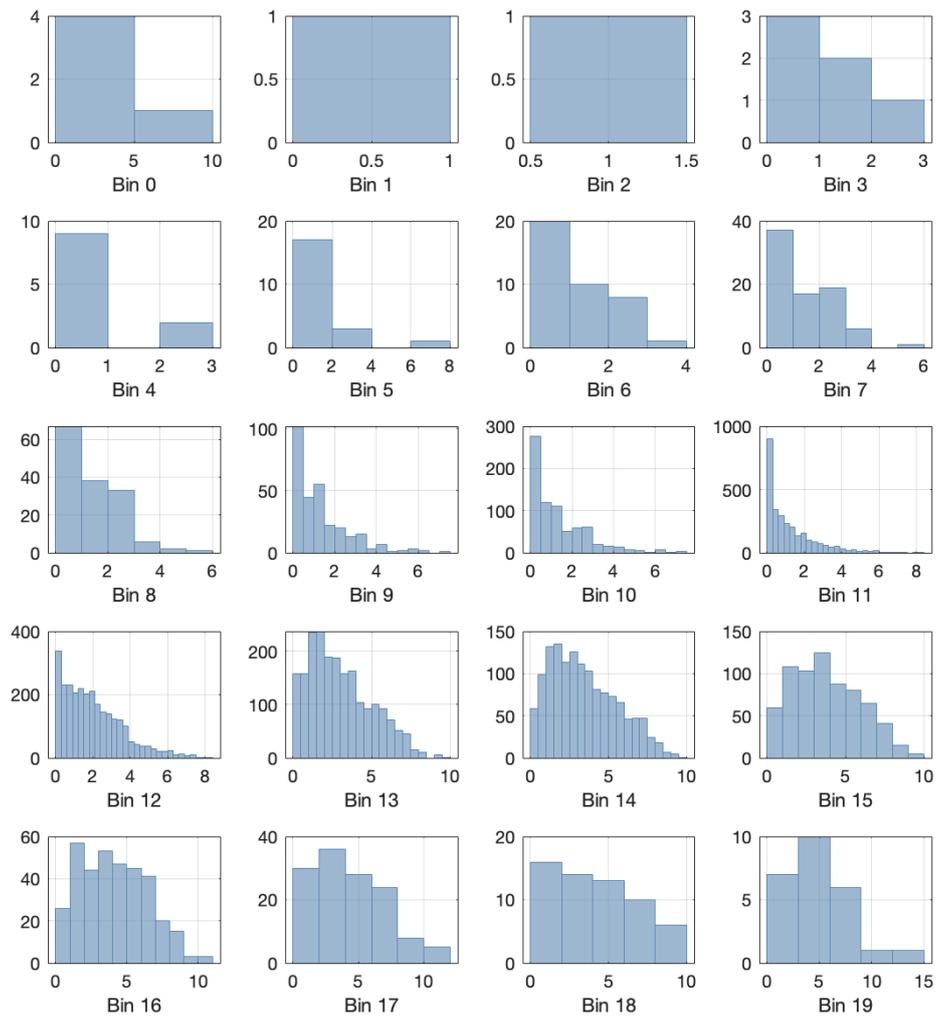


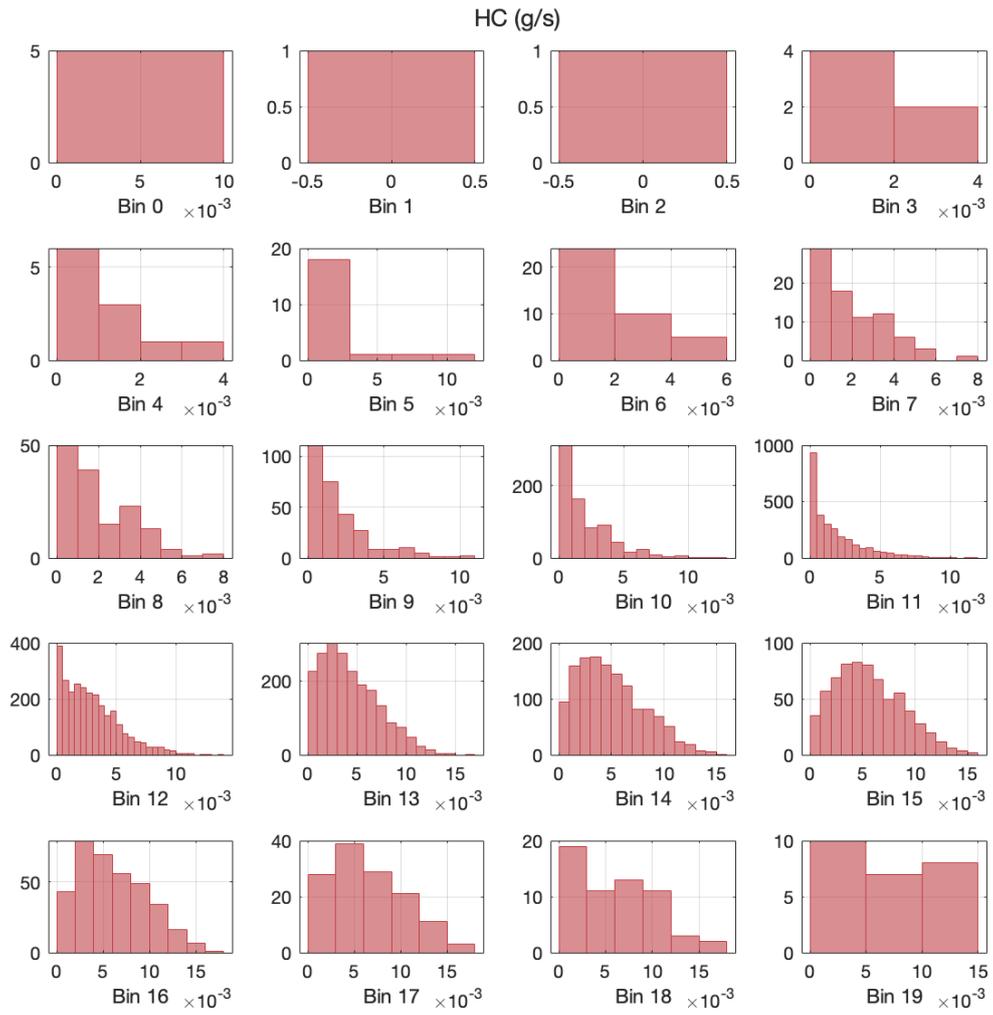


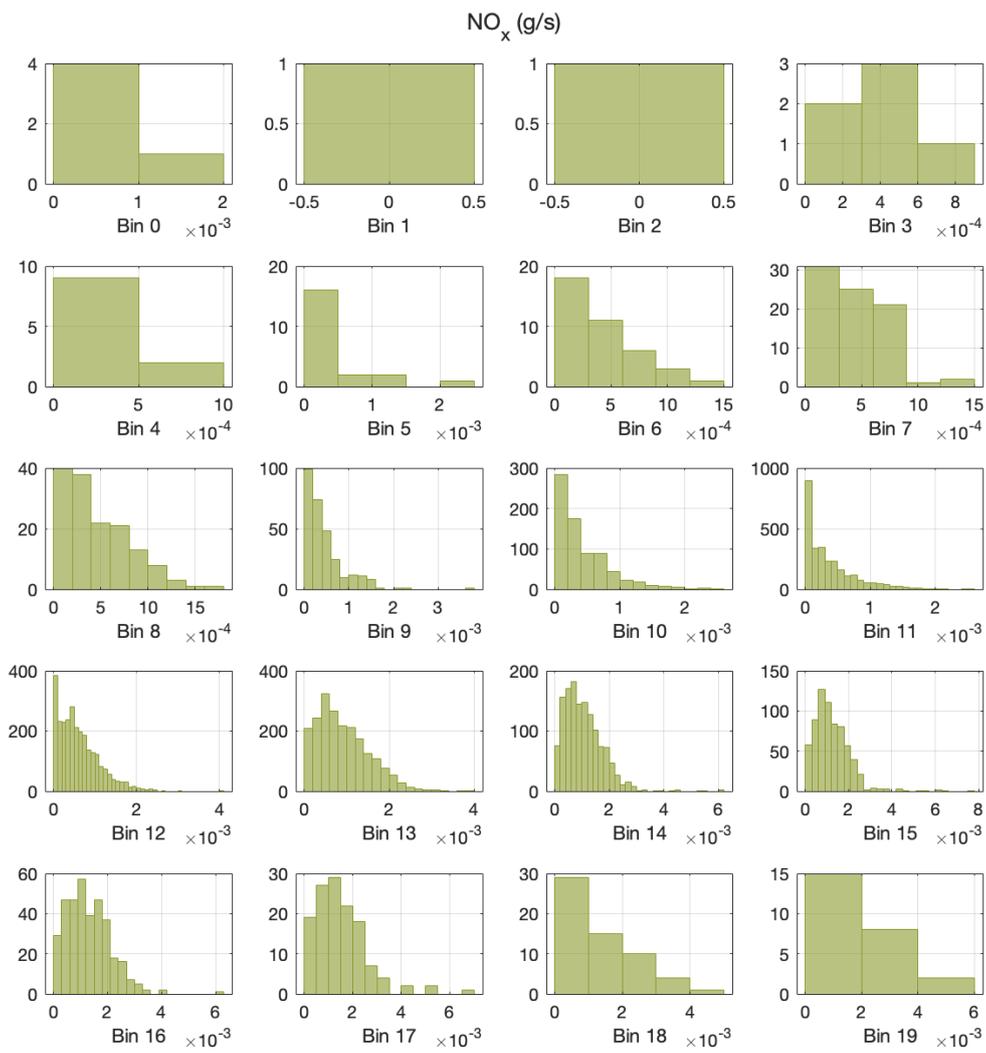
ANEXO 4: Gráficas de distribución por *bin* para la composición gasolina – etanol al 10%



CO₂ (g/s)







ANEXO 5: Tablas de resultados obtenidos para la composición
gasolina – etanol al 10%

CO₂

Bin	Mean	Median	Std	Q1	Q3	MC	IQR	Min	Max
3	1.2420	0.9868	0.7718	0.7899	1.3552	0.3034	0.5654	-0.0582	2.2033
4	0.7736	0.4444	0.8071	0.2824	0.9168	0.4159	0.6343	-0.6691	1.8683
5	1.3209	0.8852	1.5006	0.5075	1.2563	0.3435	0.7488	-0.6157	2.3796
6	1.1740	0.8083	1.0115	0.3010	1.9676	0.4268	1.6666	-2.1990	4.4676
7	1.3399	1.0631	1.1562	0.2970	2.2297	0.2563	1.9328	-2.6022	5.1289
8	1.3185	1.0364	1.1331	0.4429	2.1669	0.2758	1.7240	-2.1431	4.7530
9	1.3041	0.9831	1.3369	0.2970	1.8788	0.2287	1.5818	-2.0756	4.2514
10	1.3170	0.9243	1.3783	0.2910	2.0995	0.3031	1.8085	-2.4218	4.8124
11	1.1902	0.7503	1.3327	0.1501	1.8022	0.3644	1.6522	-2.3282	4.2805
12	2.0022	1.7163	1.5834	0.7506	2.9121	0.1571	2.1614	-2.4915	6.1542
13	3.0121	2.6478	1.9948	1.4240	4.3432	0.1957	2.9192	-2.9547	8.7219
14	3.4380	3.1216	2.1165	1.6708	4.9302	0.1554	3.2594	-3.2183	9.8194
15	3.8244	3.6191	2.1465	2.0768	5.4446	0.1004	3.3678	-2.9750	10.4964
16	4.1348	3.9314	2.2981	2.1772	5.8123	0.0835	3.6351	-3.2755	11.2650
17	4.3304	3.9790	2.6486	2.1717	6.4024	0.1399	4.2307	-4.1744	12.7486
18	4.1117	3.5231	2.7163	1.9821	6.1603	0.2326	4.1782	-4.2851	12.4276
19	5.0317	4.7366	2.9660	2.8405	7.3947	0.0810	4.5542	-3.9908	14.2260

CO

Bin	Mean	Median	Std	Q1	Q3	MC	IQR	Min	Max
3	0.0606	0.0381	0.0555	0.0253	0.0728	0.4599	0.0475	-0.0460	0.1441
4	0.0381	0.0168	0.0510	0.0126	0.0271	0.5044	0.0145	-0.0092	0.0489
5	0.0679	0.0439	0.0810	0.0158	0.0737	0.2581	0.0579	-0.0711	0.1606
6	0.0638	0.0295	0.0612	0.0163	0.1130	0.6708	0.0968	-0.1289	0.2582
7	0.0692	0.0480	0.0613	0.0158	0.1229	0.4035	0.1071	-0.1448	0.2836
8	0.0701	0.0476	0.0649	0.0161	0.1298	0.4329	0.1137	-0.1545	0.3004
9	0.0695	0.0445	0.0757	0.0152	0.1106	0.3808	0.0954	-0.1279	0.2538
10	0.0713	0.0438	0.0779	0.0122	0.1139	0.4163	0.1018	-0.1405	0.2666
11	0.0646	0.0366	0.0753	0.0077	0.0955	0.4319	0.0878	-0.1239	0.2272
12	0.1058	0.0829	0.0896	0.0330	0.1568	0.2695	0.1238	-0.1526	0.3425
13	0.1537	0.1358	0.1064	0.0688	0.2262	0.1643	0.1574	-0.1673	0.4624
14	0.1763	0.1538	0.1181	0.0761	0.2564	0.1992	0.1803	-0.1943	0.5269
15	0.1937	0.1833	0.1195	0.0972	0.2753	0.0501	0.1781	-0.1700	0.5425
16	0.2037	0.1818	0.1292	0.0963	0.2979	0.1805	0.2016	-0.2062	0.6003
17	0.2118	0.1733	0.1439	0.0988	0.3098	0.3245	0.2111	-0.2179	0.6264
18	0.2074	0.1621	0.1492	0.0778	0.3095	0.3369	0.2317	-0.2698	0.6570
19	0.2353	0.2098	0.1631	0.0917	0.3131	0.0941	0.2214	-0.2405	0.6453

HC

Bin	Mean	Median	Std	Q1	Q3	MC	IQR	Min	Max
3	0.0019	0.0016	0.0011	0.0013	0.0023	0.4342	0.0032	-0.0035	0.0071
4	0.0011	0.0010	0.0009	0.0004	0.0016	0.0628	0.0039	-0.0055	0.0074
5	0.0020	0.0014	0.0024	0.0007	0.0018	0.1232	0.0034	-0.0044	0.0068
6	0.0018	0.0014	0.0015	0.0005	0.0029	0.2908	0.0032	-0.0043	0.0076
7	0.0020	0.0017	0.0017	0.0005	0.0033	0.1393	0.0028	-0.0038	0.0075
8	0.0020	0.0016	0.0017	0.0005	0.0032	0.2330	0.0031	-0.0041	0.0078
9	0.0020	0.0015	0.0020	0.0004	0.0027	0.1771	0.0034	-0.0047	0.0079
10	0.0020	0.0014	0.0020	0.0004	0.0031	0.2826	0.0033	-0.0046	0.0080
11	0.0018	0.0012	0.0020	0.0002	0.0026	0.3283	0.0029	-0.0042	0.0070
12	0.0029	0.0025	0.0023	0.0011	0.0043	0.1610	0.0027	-0.0030	0.0083
13	0.0043	0.0038	0.0029	0.0021	0.0062	0.2058	0.0034	-0.0030	0.0113
14	0.0050	0.0045	0.0031	0.0025	0.0070	0.1579	0.0032	-0.0023	0.0118
15	0.0056	0.0052	0.0032	0.0031	0.0078	0.1189	0.0036	-0.0022	0.0131
16	0.0062	0.0056	0.0035	0.0032	0.0086	0.1744	0.0033	-0.0017	0.0135
17	0.0065	0.0059	0.0040	0.0035	0.0094	0.1554	0.0040	-0.0025	0.0154
18	0.0062	0.0045	0.0042	0.0026	0.0094	0.4696	0.0029	-0.0018	0.0138
19	0.0074	0.0074	0.0041	0.0041	0.0108	0.0000	0.0042	-0.0022	0.0171

NO_x

Bin	Mean	Median	Std	Q₁	Q₃	MC	IQR	Min	Max
3	0.0004	0.0005	0.0002	0.0003	0.0005	-0.2871	0.0002	0.0000	0.0008
4	0.0003	0.0002	0.0003	0.0001	0.0004	0.4855	0.0004	-0.0005	0.0010
5	0.0004	0.0003	0.0005	0.0001	0.0004	0.1240	0.0003	-0.0003	0.0008
6	0.0004	0.0003	0.0003	0.0001	0.0006	0.2820	0.0005	-0.0007	0.0014
7	0.0004	0.0004	0.0003	0.0001	0.0006	0.1225	0.0005	-0.0007	0.0014
8	0.0005	0.0004	0.0004	0.0001	0.0007	0.2202	0.0006	-0.0007	0.0016
9	0.0004	0.0003	0.0005	0.0001	0.0006	0.2508	0.0005	-0.0007	0.0013
10	0.0004	0.0003	0.0004	0.0001	0.0006	0.2178	0.0006	-0.0007	0.0015
11	0.0004	0.0002	0.0004	0.0000	0.0005	0.3247	0.0005	-0.0007	0.0013
12	0.0006	0.0005	0.0005	0.0002	0.0009	0.2062	0.0006	-0.0007	0.0018
13	0.0009	0.0008	0.0006	0.0004	0.0013	0.1886	0.0009	-0.0008	0.0026
14	0.0011	0.0009	0.0007	0.0005	0.0014	0.1730	0.0009	-0.0008	0.0028
15	0.0012	0.0011	0.0009	0.0006	0.0017	0.1888	0.0010	-0.0009	0.0032
16	0.0013	0.0012	0.0008	0.0007	0.0018	0.1680	0.0011	-0.0010	0.0035
17	0.0015	0.0013	0.0011	0.0007	0.0020	0.1154	0.0013	-0.0013	0.0040
18	0.0014	0.0010	0.0010	0.0006	0.0020	0.3698	0.0015	-0.0016	0.0043
19	0.0019	0.0018	0.0013	0.0009	0.0024	-0.1481	0.0015	-0.0013	0.0047