



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**“EMISIONES A LA ATMÓSFERA POR CONSUMO DE
COMBUSTÓLEO Y POR CAMBIO A GAS NATURAL EN UNA
CENTRAL TERMOELÉCTRICA DE INTERÉS”**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERA QUÍMICA

PRESENTA:

EVELIN MATEOS DÍAZ



MÉXICO, D.F.

2016



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE:	Profesor: LUNA PABELLO VÍCTOR MANUEL
VOCAL:	Profesor: GARCIA REYNOSO JOSÉ AGUSTÍN
SECRETARIO:	Profesor: SOSA ECHEVERRÍA RODOLFO
1er. SUPLENTE:	Profesor: ANDRACA AYALA GEMA LUZ
2° SUPLENTE:	Profesor: MENDOZA CAMPOS ALEJANDRA

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:

SECCIÓN DE CONTAMINACIÓN AMBIENTAL. CENTRO DE CIENCIAS DE LA ATMÓSFERA, UNAM.

ASESOR DEL TEMA:

DR. RODOLFO SOSA ECHEVERRÍA

SUPERVISOR TÉCNICO:

DR. HUMBERTO BRAVO ÁLVAREZ

SUSTENTANTE:

EVELIN MATEOS DÍAZ

CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	i
ÍNDICE DE FIGURAS	iii
ABREVIATURAS Y SIGLAS	vii
RESUMEN	xii
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
Justificación.....	3
Meta	4
Objetivos	4
CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES	5
2.1 Centrales de generación de electricidad	5
2.2 Proceso de generación de energía eléctrica en plantas termoeléctricas	7
2.3 Tipos de quemadores	10
2.4 Combustibles	11
2.5 Normatividad.....	12
2.6 Emisiones a la atmósfera en centrales termoeléctricas	22
2.7 Emisiones a la atmósfera por parte de la Central Termoeléctrica de interés.	23
2.8 Contaminantes a evaluar	25
2.8.1 Contaminantes criterio.....	27
2.8.2 Gases de efecto invernadero (GEI)	30
2.8.3 Contaminantes tóxicos orgánicos	33
2.8.4 Contaminantes tóxicos inorgánicos	40
CAPÍTULO 3. DESCRIPCIÓN DEL SITIO DE ESTUDIO.....	48
3.1 Zona crítica Tula-Vito-Apasco.....	48
3.2 Central Termoeléctrica “Francisco Pérez Ríos” (CTFPR).....	50

CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA DE ESTIMACIÓN DE EMISIONES	53
4.1 Factores de emisión seleccionados	56
4.2 Estimación de emisiones para combustóleo.	62
4.3 Balance energético para calcular el consumo de gas natural	64
4.4 Estimación de emisiones para Gas Natural	65
CAPÍTULO 5. RESULTADOS	67
5.1 Resultados comparativos de emisiones por tipo de contaminante.....	67
CAPÍTULO 6. EVALUACIÓN DE RESULTADOS	83
6.1 Análisis de resultados	83
6.1.1 Análisis estadístico de la distribución de los datos.	84
6.1.2 Análisis de la variabilidad de los datos.	90
CAPÍTULO 7. BENEFICIOS DE LA SUSTITUCIÓN DE COMBUSTIBLE.....	98
7.1 Identificación de posibles beneficios en el ambiente y en el proceso.	98
7.1.1 Beneficios en el ambiente.....	98
7.1.2 Beneficios en el proceso.....	99
CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	101
8.1 Conclusiones.....	101
8.2 Recomendaciones	103
BIBLIOGRAFÍA	105
ANEXO I Diagramas de Caja	115

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2. 1 Centrales termoeléctricas en México.....	6
Tabla 2. 2 Niveles de emisión permisibles para los equipos de la CTFPR establecidos en la NOM-O85-SEMARNAT-2011.	13
Tabla 2. 3 Características de los combustibles de interés establecidas en la NOM-085-SEMARNAT-2011.....	13
Tabla 2. 4 Características básicas del combustóleo establecidas en la NOM-086-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005.	14
Tabla 2. 5 Características del Gas Natural establecidas en la NOM-001-SECRE-2010.	15
Tabla 2. 6 Normas para calidad del aire de los diferentes contaminantes criterio.	16
Tabla 2. 7 Límites máximos permisibles de contaminantes criterio, establecidos por la OMS.	17
Tabla 2. 8 Valores de toxicidad para contaminantes tóxicos orgánicos (información obtenida del IRIS).....	20
Tabla 2. 9 Valores de toxicidad para contaminantes tóxicos inorgánicos (información obtenida del IRIS).....	21
Tabla 2. 10 Emisiones de contaminantes generados por la Central Termoeléctrica Francisco Pérez Ríos.	23
Tabla 2. 11 Emisiones generadas por la central termoeléctrica de interés reportados en el RETC.....	24
Tabla 2. 12 Características de los hidrocarburos aromáticos policíclicos.....	37
Tabla 2. 13 Clasificación de compuestos, según la IARC.	39

Tabla 4. 1 Factores de emisión de contaminantes criterio por la combustión de combustóleo y gas natural.....	58
Tabla 4. 2 Factores de emisión para gases de efecto invernadero por la combustión de combustóleo y gas natural.	59
Tabla 4. 3 Factores de emisión de contaminantes orgánicos por la combustión de combustóleo y gas natural.....	59
Tabla 4. 4 Factores de emisión para hidrocarburos aromáticos policíclicos por la combustión de combustóleo y gas natural.	60
Tabla 4. 5 Factores de emisión de contaminantes tóxicos inorgánicos por la combustión de combustóleo y gas natural.	60
Tabla 4. 6 Especificaciones generales para la Unidad de generación 1, del día 22 de enero de 2010.	62
Tabla 4. 7 Valores de poder calorífico de combustibles.	65
Tabla 5. 1 Días de operación de cada unidad de generación.....	67
Tabla 6. 1 Estadísticos descriptivos de emisión de SO ₂ utilizando combustóleo. .	86
Tabla 6. 2 Estadísticos descriptivos de emisión de SO ₂ utilizando gas natural.	86
Tabla 6. 3 Estadísticos descriptivos de emisión de NO _x utilizando combustóleo..	87
Tabla 6. 4 Estadísticos descriptivos de emisión de NO _x utilizando gas natural. ...	87
Tabla 6. 5 Estadísticos descriptivos de emisión de CO ₂ utilizando combustóleo. .	88
Tabla 6. 6 Estadísticos descriptivos de emisión de CO ₂ utilizando gas natural.....	88
Tabla 6. 7 Estadísticos descriptivos de emisión de CH ₄ utilizando combustóleo. .	89
Tabla 6. 8 Estadísticos descriptivos de emisión de CH ₄ utilizando gas natural.	89

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2. 1 Diagrama de descripción del proceso de generación de electricidad en la Central Termoeléctrica “Francisco Pérez Ríos” (CTFPR).....	9
Figura 2. 2 Mecanismo de efecto invernadero.	31
Figura 3. 1 Ubicación de la CTFPR con respecto a los municipios pertenecientes a la ZC Tula- Vito– Apasco y a la Ciudad de México.....	49
Figura 3. 2 Unidades 1 y 2 de la Central Termoeléctrica “Francisco Pérez Ríos” vista de las chimeneas de las unidades durante la visita de trabajo.....	51
Figura 3. 3 Vista lateral de la Unidad 2.....	51
Figura 5. 1 Emisión de SO ₂ con ambos combustibles.....	68
Figura 5. 2 Emisión de NO _x con ambos combustibles.....	68
Figura 5. 3 Emisión de CO con ambos combustibles.....	68
Figura 5. 4 Emisión de Pb con ambos combustibles.....	69
Figura 5. 5 Emisión de partículas totales con ambos combustibles.....	69
Figura 5. 6 Emisión de N ₂ O con ambos combustibles.....	69
Figura 5. 7 Emisión de CO ₂ con ambos combustibles.....	70
Figura 5. 8 Emisión de CH ₄ con ambos combustibles.....	70
Figura 5. 9 Emisión de COT con ambos combustibles.....	70
Figura 5. 10 Emisión de benceno con ambos combustibles.....	71
Figura 5. 11 Emisión de formaldehído con ambos combustibles.....	71
Figura 5. 12 Emisión de tolueno con ambos combustibles.....	71
Figura 5. 13 Emisión de acenafteno con ambos combustibles.....	72
Figura 5. 14 Emisión de acenaftileno con ambos combustibles.....	72
Figura 5. 15 Emisión de antraceno con ambos combustibles.....	72

Figura 5. 16 Emisión de benzo (a) antraceno con ambos combustibles.....	73
Figura 5. 17 Emisión de benzo (b,k) fluoranteno con ambos combustibles.....	73
Figura 5. 18 Emisión de benzo (g,h,i) perileno con ambos combustibles.....	73
Figura 5. 19 Emisión de criseno con ambos combustibles.....	74
Figura 5. 20 Emisión de dibenzo(a, h) antraceno con ambos combustibles.....	74
Figura 5. 21 Emisión de fenantreno con ambos combustibles.....	74
Figura 5. 22 Emisión de fluoranteno con ambos combustibles.....	75
Figura 5. 23 Emisión de fluoreno con ambos combustibles.....	75
Figura 5. 24 Emisión de Indeno (1, 2,3-cd) pireno con ambos combustibles.....	75
Figura 5. 25 Emisión de naftaleno con ambos combustibles.....	76
Figura 5. 26 Emisión de pireno con ambos combustibles.....	76
Figura 5. 27 Emisión de arsénico con ambos combustibles.....	76
Figura 5. 28 Emisión de bario con ambos combustibles.....	77
Figura 5. 29 Emisión de berilio con ambos combustibles.....	77
Figura 5. 30 Emisión de cadmio con ambos combustibles.....	77
Figura 5. 31 Emisión de cobalto con ambos combustibles.....	78
Figura 5. 32 Emisión de cobre con ambos combustibles.....	78
Figura 5. 33 Emisión de cromo con ambos combustibles.....	78
Figura 5. 34 Emisión de manganeso con ambos combustibles.....	79
Figura 5. 35 Emisión de mercurio con ambos combustibles.....	79
Figura 5. 36 Emisión de molibdeno con ambos combustibles.....	79
Figura 5. 37 Emisión de níquel con ambos combustibles.....	80
Figura 5. 38 Emisión de selenio con ambos combustibles.....	80
Figura 5. 39 Emisión de vanadio con ambos combustibles.....	80

Figura 5. 40 Emisión de zinc con ambos combustibles.....	81
Figura 5. 41 Resumen de emisión de contaminantes con ambos combustibles.....	82
Figura 6. 1 Diagrama de caja para la emisión de SO ₂ utilizando A) combustóleo B) gas natural.....	86
Figura 6. 2 Diagrama de caja para la emisión de NO _x utilizando A) combustóleo B) gas natural.....	87
Figura 6. 3 Diagrama de caja para la emisión de CO ₂ utilizando A) combustóleo B) gas natural.....	88
Figura 6. 4 Diagrama de caja para la emisión de CH ₄ utilizando A) combustóleo B) gas natural.....	89
Figura 6. 5 Porcentaje de diferencia relativa de las emisiones de SO ₂ utilizando combustóleo.....	91
Figura 6. 6 Porcentaje de diferencia relativa de las emisiones de SO ₂ utilizando gas natural.....	91
Figura 6. 7 Porcentaje de diferencia relativa de las emisiones de SO ₂ de la Unidad 1, considerando los 365 días.....	92
Figura 6. 8 Porcentaje de diferencia relativa de las emisiones de SO ₂ de la Unidad 1, considerando sólo los días de operación de la unidad.....	93
Figura 6. 9 Porcentaje de diferencia relativa de las emisiones de SO ₂ de la Unidad 2, considerando los 365 días.....	93
Figura 6. 10 Porcentaje de diferencia relativa de las emisiones de SO ₂ de la Unidad 2, considerando sólo los días de operación de la unidad.....	94

Figura 6. 11 Porcentaje de diferencia relativa de las emisiones de SO ₂ de la Unidad 3, considerando los 365 días.....	94
Figura 6. 12 Porcentaje de diferencia relativa de las emisiones de SO ₂ de la Unidad 3, considerando sólo los días de operación de la unidad.....	95
Figura 6. 13 Porcentaje de diferencia relativa de las emisiones de SO ₂ de la Unidad 4, considerando los 365 días.....	95
Figura 6. 14 Porcentaje de diferencia relativa de las emisiones de SO ₂ de la Unidad 4, considerando sólo los días de operación de la unidad.....	96
Figura 6. 15 Porcentaje de diferencia relativa de las emisiones de SO ₂ de la Unidad 5, considerando los 365 días.....	96
Figura 6. 16 Porcentaje de diferencia relativa de las emisiones de SO ₂ de la Unidad 5, considerando sólo los días de operación de la unidad.....	97

ABREVIATURAS Y SIGLAS

ASTM	Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (siglas en inglés)
atm	atmósfera
ATSDR	Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (Siglas en inglés)
Btu	Unidad Térmica Británica (siglas en inglés)
C1	Consumo diario de combustóleo
C2	Consumo diario de gas natural calculado
CH ₄	Metano
CC	Caballos Caldera
CCA	Comisión para la Cooperación Ambiental
CCA	Centro de Ciencias de la Atmósfera
CDC	Centros para el Control y la Prevención de Enfermedades (Siglas en inglés)
CFE	Comisión Federal de Electricidad
CO	Monóxido de carbono
CONAMA	Comisión Nacional del Medio Ambiente
COT	Compuestos Orgánicos Totales
CTFPR	Central Termoeléctrica “Francisco Pérez Ríos”
CO ₂	Dióxido de carbono
°C	Grados Celsius
cSt	centistokes
FE	Factor de emisión

ft ³	pie cúbico
g	gramos
gal	galones
GEI	Gases de Efecto Invernadero
Gg	Gigagramo
GJ	Gigajoule
GN	Gas Natural
GWh	Gigawatt-hora
h	hora
HAPs	Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos
Hg	Mercurio
HNO ₃	Ácido nítrico
IARC	Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (Siglas en inglés)
INECC	Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático
INEGI	Instituto Nacional de Estadística y Geografía Informática
IRIS	Sistema de Información Integral de Riesgo (siglas en inglés)
Kcal	kilocalorías
Kg	kilogramo
Kg/l	kilogramos por litro
l	litro

lb	libra
LGEEPA	Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente
m	metros
MCE2	Centro Molina para Estudios Estratégicos sobre Energía y Medio Ambiente (Siglas en inglés)
MJ	Megajoule
MW	Megawatt
m ³	Metro cúbico
N	Nitrógeno
NA	Nivel de Actividad
NFPA	Asociación Nacional de Protección contra el Fuego (Siglas en inglés)
NOM	Norma Oficial Mexicana
NO	Óxido nítrico
NO ₂	Dióxido de nitrógeno
NO _x	Óxidos de nitrógeno
N ₂ O	Óxido nitroso
O ₂	Oxígeno
O ₃	Ozono
OMS	Organización Mundial de la Salud
Pa	Pascal
Pb	Plomo

PC ₁	Poder calorífico del combustóleo
PC ₂	Poder calorífico del gas natural
PEMEX	Petróleos Mexicanos
PM ₁₀	Partículas Menores a 10 µm
PM _{2.5}	Partículas Menores a 2.5 µm
ppm _v	Partes por millón volumen
ppm _p	Partes por millón peso
PST	Partículas Suspendidas Totales
PT	Partículas Totales
RETC	Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes
S	Azufre
SCFI	Secretaria de Comercio y Fomento Industrial
SECRE	Secretaria de Energía, Comisión Reguladora de Energía
SEMARNAT	Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales
SEMARNATH	Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales del Gobierno del Estado de Hidalgo
SENER	Secretaria de Energía
SIE	Sistema de Información Energética
SO ₂	Dióxido de azufre
SSA	Secretaria de Salud
Ton	Tonelada
U1	Unidad de Generación 1

U2	Unidad de Generación 2
U3	Unidad de Generación 3
U4	Unidad de Generación 4
U5	Unidad de Generación 5
UAEH	Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo
US-EPA	Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos
	(Siglas en ingles)
ZC	Zonas Críticas
ZMCM	Zona Metropolitana de la Ciudad de México
η_1	Eficiencia de conversión de combustóleo
η_2	Eficiencia de conversión de gas natural
μg	microgramos

RESUMEN

En la actualidad ha incrementado el interés por parte del sector de generación de energía en la reducción de emisiones de contaminantes, por lo que se han comenzado a utilizar tecnologías de generación de electricidad más limpias, además se ha implementado la sustitución de combustibles por gas natural debido a que se produce una combustión más limpia; esta acción será implementada en la central termoeléctrica de interés.

La elección del sitio de estudio se basó en la ubicación de la Central Termoeléctrica “Francisco Pérez Ríos” (CTFPR), en la Zona Crítica (ZC) Tula-Vito-Apasco. Debido a esta clasificación es necesario tomar medidas preventivas y correctivas para disminuir la emisión de contaminantes atmosféricos, asegurando el cumplimiento de la normatividad ambiental vigente.

Uno de los principales problemas del sitio, se debe en gran medida a las altas emisiones de dióxido de azufre (SO_2), siendo una de las fuentes más importantes la combustión de combustóleo con alto contenido de azufre, lo cual favorece el incremento en las emisiones de SO_2 ; además del impacto potencial como precursor de lluvia ácida.

En esta investigación se aplicó la metodología de factores de emisión (FE), utilizando los factores desarrollados por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (US-EPA) para la estimación de las emisiones de contaminantes criterio, contaminantes tóxicos tanto orgánicos como inorgánicos, así como gases de efecto invernadero, a partir de consumo real diario de combustóleo por unidad de generación, para el año 2010.

Se realizó la estimación para el uso actual de combustóleo y el cambio a gas natural; se compararon las emisiones generadas por ambos combustibles y se identificó la reducción del 99.98% de SO_2 , 43.15% de óxidos de nitrógeno (NO_x), 39.92% de dióxido de carbono (CO_2), por mencionar algunos de los contaminantes

más importantes. Del mismo modo se identificaron los contaminantes que incrementan su emisión al reemplazar el combustible, siendo estos el monóxido de carbono (CO) en un 17.14%, 0.33 % de metano (CH₄), 22.60 % de compuestos orgánicos totales (COT) y 16.57 % de benceno.

Con base a la información resultante de la estimación de emisiones, se identificaron posibles efectos en el proceso y en el ambiente, como la disminución de la contribución de esta central termoeléctrica a la reducción de emisiones de precursores de lluvia ácida y de gases de efecto invernadero, así como la disminución de la cantidad de hollín generado y que ocasiona incrustaciones en las tuberías ocasionando que se tenga que utilizar mayor cantidad de combustible; todos estos efectos originados por la sustitución de combustible.

Lo anterior sirvió para poder proponer una serie de recomendaciones para minimizar los efectos adversos del cambio de combustible, identificando áreas de mejora como la reconfiguración de los quemadores, el desarrollo de factores de emisión para plantas en México, así como el monitoreo de emisiones utilizando gas natural para considerar la instalación de algún otro equipo de control a futuro, todas estas acciones encaminadas a la reducción de emisiones y a mejorar la calidad del aire de la región.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial el consumo de electricidad y la generación de la misma, han ido variando considerablemente dependiendo del crecimiento de la población, la economía del país y el desarrollo tecnológico del mismo.

El uso de combustibles fósiles es el método más empleado para la generación de electricidad, sin embargo, en la actualidad ha ido disminuyendo conforme se van implementando tecnologías de generación de electricidad más limpias, como es el caso de la solar, la eólica y la generación a partir de gas natural.

En México a finales del año 2014, la infraestructura de generación de energía eléctrica constaba de 215 centrales distribuidas alrededor del país. En estas centrales se contaba con 1,081 unidades de generación. La capacidad instalada era de 54,374.7 MW. Esta capacidad incluye a las centrales de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y a los Productores Independientes de Energía (CFE, 2014).

La demanda generada en los últimos años ha causado la emisión de contaminantes atmosféricos, el tipo de contaminantes emitidos y las cantidades van a depender del combustible consumido para la generación de electricidad. Para el combustóleo y el gas natural los principales contaminantes emitidos son: CO, plomo (Pb), NO_x, partículas suspendidas, óxidos de azufre y metales, entre otros (Zuk et al., 2006).

En el Inventario Nacional de Emisiones de 2008, en el sector de generación, transmisión y distribución de energía eléctrica se produjeron 68,949.54 ton de PM₁₀, 58,271.17 ton de PM_{2.5}, 1,053,028.61 ton de SO₂, 72,404.62 ton de CO, 337,810.85 ton de NO_x y 7,690.90 ton de compuestos orgánicos volátiles (COV) (SEMARNAT, 2008).

Para poder decidir la medida adecuada para la reducción de emisiones es necesario determinar el tipo y la cantidad de emisiones que están siendo generadas por la fuente.

Una metodología de estimación de emisiones es el uso de factores de emisión, aunque en México existen algunos esfuerzos para su desarrollo, estos factores solo han sido desarrollados para estudios de caso en plantas específicas (Cureño, 2010; Cureño et al., 2012), por lo anterior se utilizaron los FE desarrollados por la US-EPA. Sin embargo, se tienen que considerar los requerimientos para aplicar este método, así como las limitaciones que el uso de estos factores implica como lo es tipo de combustible, la capacidad de las unidades de generación, configuración de los quemadores, las características del combustible, así como su eficiencia de conversión.

Justificación

Ante la creciente preocupación por reducir las emisiones de contaminantes a la atmósfera, es necesario establecer estrategias de prevención, minimización o control; las cuales deben enfocarse en aquellos contaminantes que se emiten en mayor cantidad o aquellos que causan mayor impacto a la salud o al ambiente, de acuerdo a la investigación científica existente, como lo son contaminantes atmosféricos criterio y contaminantes atmosféricos tóxicos.

Para poder identificar estas estrategias, es necesario medir o estimar las emisiones. El propósito de esta investigación es la estimación de emisiones de los diferentes contaminantes producidos por la combustión de combustóleo y gas natural, con la finalidad de poder comparar las emisiones y poder identificar los efectos que el cambio de combustible puede llegar a ocasionar en el ambiente y en el proceso.

Estudios sobre la emisión de contaminantes por el uso de combustibles fósiles han demostrado que existen ciertas ventajas del gas natural sobre el combustóleo, las más significativas se ven reflejadas en el ámbito ambiental (Corvalán et al., 2003) y en el económico (Arroyo, 2005).

El objetivo de la estimación y comparación, es identificar áreas de oportunidad que conlleven a la minimización y control de emisiones de contaminantes, además de proponer recomendaciones adecuadas para reducir los posibles efectos negativos derivados del cambio de combustible.

Meta

Estimar las emisiones de contaminantes atmosféricos derivadas del proceso de generación de electricidad en la Central Termoeléctrica "Francisco Pérez Ríos", por el uso actual de combustóleo y el cambio a gas natural.

Objetivos

- * Aplicar los factores de emisión disponibles en el documento AP-42 publicado por la US-EPA, para la estimación de emisiones de los diferentes contaminantes.
- * Estimar las emisiones de contaminantes criterio, gases de efecto invernadero y contaminantes tóxicos orgánicos e inorgánicos, utilizando la metodología de factores de emisión con base en el consumo real diario y por unidad de generación de combustóleo, para el año 2010.
- * Realizar un balance energético para determinar el consumo de gas natural, utilizando el poder calorífico del combustible y considerando que se producirá la misma cantidad de electricidad que la generada consumiendo combustóleo.
- * Identificar posibles efectos que el cambio de combustible ocasionará en el proceso y en el medio ambiente.
- * Proponer recomendaciones para prevenir, minimizar y controlar las emisiones de contaminantes atmosféricos, ocasionadas por el proceso de generación de electricidad utilizando gas natural.

CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES

2.1 Centrales de generación de electricidad

El Sistema Eléctrico Nacional incluye el sector público y el privado. La infraestructura general incluye las siguientes fases (SENER, 2014):

- * Generación
- * Transformación y transmisión en alta tensión
- * Distribución en media y baja tensión
- * Ventas a usuarios finales

El paso de mayor importancia es la generación en la cual el sector público tiene mayor participación. Para el año 2014 a nivel nacional, la participación porcentual en la generación de electricidad de CFE, fue del 76.4%, mientras que el 23.6% corresponde a los productores independientes de energía.

La CFE clasifica las centrales de generación de electricidad en 10 diferentes tipos de tecnología:

- | | |
|------------------------------|----------------------|
| * Vapor (combustóleo y gas) | * Combustión interna |
| * Carboeléctrica | * Hidroeléctrica |
| * Geotermoeléctrica | * Eoloeléctrica |
| * Ciclo combinado | * Nucleoeléctrica |
| * Turbogás | * Solar fotovoltaica |

Del porcentaje correspondiente a CFE, el 21% corresponde a tecnología vapor con combustóleo y gas (termoeléctricas).

Las centrales termoeléctricas se clasifican de acuerdo al combustible que utilizan para la producción de vapor, siendo los más importantes combustóleo y gas natural. En México existen varias centrales de generación de electricidad con tecnología termoeléctrica alrededor del país, destacando las siguientes (tabla 2.1):

Tabla 2. 1 Centrales termoeléctricas en México.

Central	Estado	No.de Unidades	Capacidad MW	Generación GWh	Factor de planta (%)*
Tuxpan (Adolfo López Mateos)	Veracruz	6	2,100	4,563	24.8
Tula (Francisco Pérez Ríos)**	Hidalgo	11	2,095	9,618	52.4
Manzanillo I (Manuel Álvarez Moreno)	Colima	8	1,454	9,136	71.7
Manzanillo II	Colima	4	1,300	3,384	29.7
Presidente Juárez (Rosarito)	Baja California	10	1,093	5,797	60.6
Valle de México	México	7	999	4,852	55.4
Altamira	Tamaulipas	4	800	1,234	17.6
Villa de Reyes	San Luis Potosí	2	700	1,380	22.5
Puerto Libertad	Sonora	4	632	1,815	32.8
El Encino (Chihuahua II)	Chihuahua	5	619	4,597	84.7
Mazatlán II (José Aceves Pozos)	Sinaloa	3	616	2,221	41.2
El Sauz	Querétaro	8	591	4,167	80.5
Salamanca	Guanajuato	2	550	2,345	48.7
Samalayuca II	Chihuahua	6	522	4,188	91.6
Río Bravo (Emilio Portes Gil)	Tamaulipas	4	511	1,983	44.3
Guaymas II (Carlos Rodríguez R.)	Sonora	4	484	1,665	39.3
Dos Bocas	Veracruz	6	452	1,453	36.7
Huinalá II	Nuevo León	2	450	2,729	69.2
San Lorenzo Potencia	Puebla	3	382	2,948	88.1
Huinalá	Nuevo León	5	378	2,008	60.7
Topolobampo II (Juan de Dios Bátiz)	Sinaloa	3	320	1,324	47.2
Samalayuca	Chihuahua	2	316	711	25.7
Francisco Villa	Chihuahua	5	300	597	22.7

*Factor de la planta se calcula con base a la operación los 365 días del año.

**Incluye 6 unidades de ciclo combinado con una capacidad de 489 MW.

Fuente: Datos técnicos de las principales centrales de CFE en operación de 2014(CFE, 2014).

2.2 Proceso de generación de energía eléctrica en plantas termoeléctricas

En una central termoeléctrica de tipo vapor, la generación de electricidad se lleva a cabo mediante la transformación de la energía química contenida en combustibles derivados del petróleo (combustóleo, diesel y gas natural) a energía térmica, para calentar agua y producir vapor con temperaturas del orden de los 520°C.

Para la central termoeléctrica de interés el proceso se describe a continuación:

El combustóleo es transportado por oleoductos y trasladado hacia los tanques de almacenamiento, pasa por un proceso de calentamiento previo para lograr que fluidifique y posteriormente entra a los quemadores del generador de vapor.

Para asegurarse de que la combustión sea completa se introduce aire al generador de vapor por medio de un ventilador de tiro forzado.

Al quemar el combustible se producen gases de combustión, los cuáles sirven para calentar el agua proveniente de la red de pozos profundos y de la planta de tratamiento de aguas, o bien el agua del condensador que es la recuperada en el proceso, y con esto se produce vapor.

Cuando los gases de combustión ya no son útiles para la generación de vapor son emitidos a la atmósfera a través de una chimenea. Para asegurarse de recuperar la energía térmica de los gases de combustión antes de su salida a la atmósfera, se encuentra instalado un pre calentador regenerativo.

El vapor generado es conducido a través de tuberías hasta las turbinas de baja, alta e intermedia presión. En la turbina se convierte la energía cinética del vapor a energía mecánica, mediante el accionamiento de los álabes de la turbina haciéndola girar.

Con la energía mecánica de la turbina, el eje de la misma mueve el generador eléctrico que es donde se lleva a cabo la producción de electricidad.

La cantidad de combustible utilizado para el proceso depende de la demanda de electricidad y el número de unidades de generación en operación.

Para minimizar las emisiones de contaminantes atmosféricos emitidas al aire por la operación de estas centrales algunas de ellas cuentan con equipos de control de emisiones, sin embargo en este caso no se cuenta con equipo de control.

El diagrama del proceso de generación de electricidad se muestra en la figura 2.1:

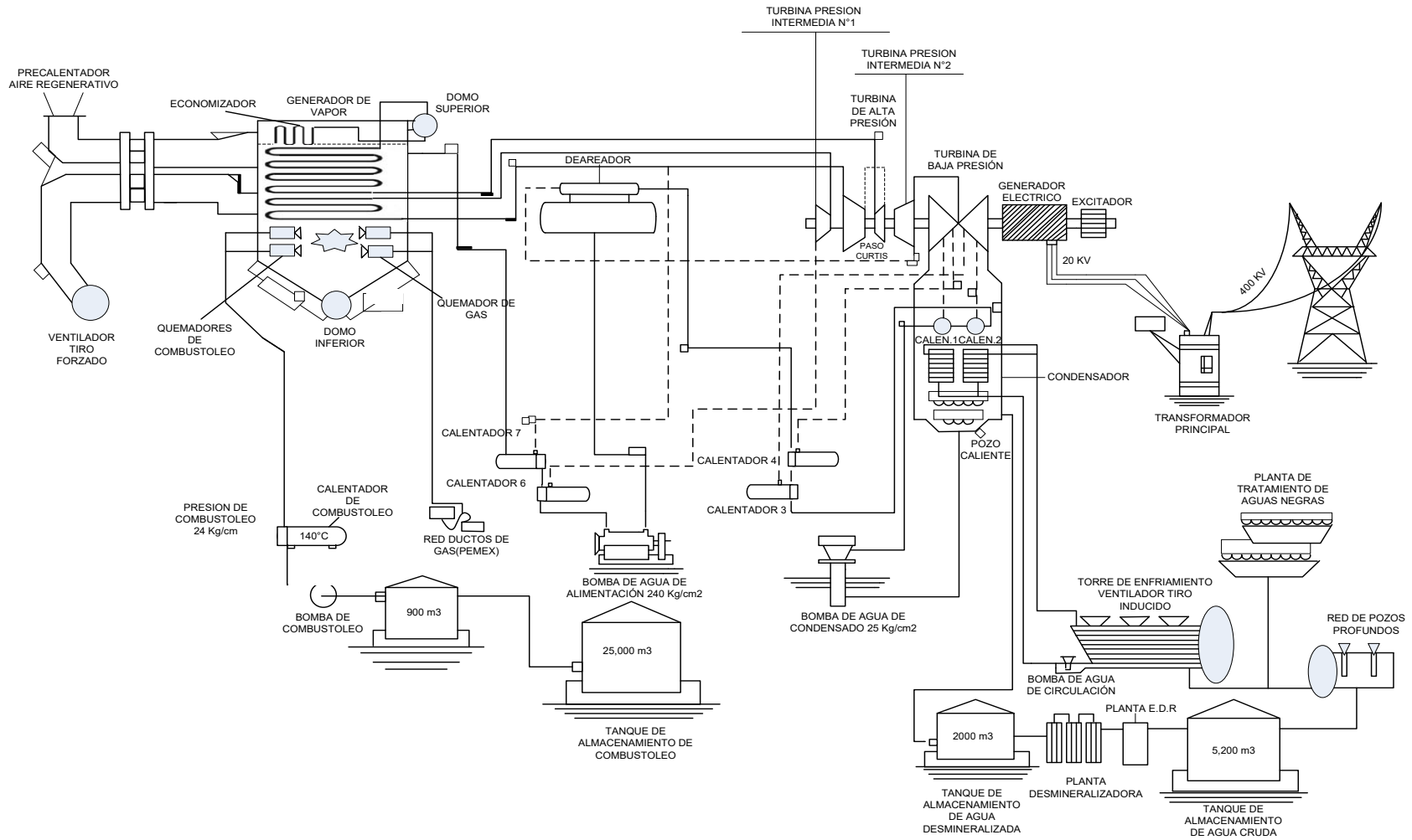


Figura 2. 1 Diagrama de descripción del proceso de generación de electricidad en la Central Termoeléctrica “Francisco Pérez Ríos” (CTFPR).

Fuente: Elaboración Propia.

2.3 Tipos de quemadores

Los generadores de vapor en centrales termoeléctricas pueden tener diferente configuración de los quemadores:

- Frontales

Los quemadores con configuración horizontal o frontal, están acomodados en hileras en la pared frontal del horno o en la parte trasera. Este sistema se caracteriza por la presencia de llamas múltiples (MAVDT, 1998).

Una de las principales características de estos quemadores es que la llama no se distribuye de manera uniforme, por lo cual se generan puntos “fríos” y puntos “calientes” disminuyendo la eficiencia de transmisión de calor. Este tipo de tecnología contribuye a la formación de NO_x por las altas temperaturas.

- Tangenciales

Los quemadores con configuración tangencial están instalados a los cuatro lados del hogar de la caldera y a diferentes niveles. La llama es dirigida de manera tangencial formando un círculo en el centro del horno, esta zona es de gran turbulencia. Se forma una llama única que proporciona estabilidad a la combustión y previene altas temperaturas disminuyendo la formación de NO_x (MAVDT, 1998). Esta configuración permite un alto grado de la mezcla aire-combustible y un mayor tiempo de residencia (CONAMA, 2009).

Este tipo de configuración proporciona que ocurra una mezcla adecuada entre el combustible y el aire con lo que aumenta la eficiencia de la combustión.

2.4 Combustibles

Un combustible es un material que puede ser encendido a una temperatura específica en presencia de aire para liberar la energía térmica contenida en él.

Los combustibles utilizados en la central termoeléctrica de interés son:

Combustóleo

Es un aceite residual derivado de la destilación de petróleo. Está compuesto de moléculas con más de 20 átomos de carbono, es una sustancia negra, viscosa e insoluble en agua (PEMEX, 2015).

El combustóleo utilizado en la CTFPR contiene en promedio 83.7% de carbono, 10.18% de hidrógeno, 0.76% de nitrógeno, 1.161% de oxígeno, 4.04% de azufre y 0.059% de cenizas (Hernández, 2014).

Gas Natural

El gas natural es una mezcla de hidrocarburos parafínicos ligeros, con el metano como su principal constituyente, con pequeñas cantidades de etano y propano, con proporciones variables de gases no orgánicos, nitrógeno, CO₂ y ácido sulfhídrico. El gas natural puede encontrarse asociado con el petróleo crudo o encontrarse independientemente en pozos de gas no asociado (gas natural que se encuentra en reservas que no contienen petróleo crudo) o gas seco (gas natural libre de hidrocarburos condensables básicamente metano) (SIE, 2015).

El gas natural que suministra PEMEX a la central termoeléctrica tiene el siguiente contenido en porcentaje mol: 89% de metano, 8.9% de etano, 1.2% propano, butano 0.1% y 3.5 ppm de azufre (Hernández, 2014).

2.5 Normatividad

En México existe la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA), la cual se encarga de establecer las bases para la preservación, restauración y mejoramiento del ambiente. En materia de contaminación atmosférica, de esta ley se deriva el Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en Materia de Prevención y Control de la Contaminación de la Atmósfera (DOF, 2015).

En el capítulo II del Reglamento se estipulan los lineamientos de la emisión de contaminantes a la atmósfera, generada por fuentes fijas, y se señalan los puntos que deben cumplir las empresas en materia de emisiones a la atmósfera.

Para la regulación de centrales termoeléctricas y las características de los combustibles utilizados en las mismas, existen las siguientes Normas Oficiales Mexicanas:

NOM-085-SEMARNAT-2011, (Publicada en Febrero 2012)- Contaminación atmosférica – Niveles máximos permisibles de emisión de los equipos de combustión de calentamiento indirecto y su medición (SEMARNAT, 2011).

En esta norma se establece que los niveles máximos permisibles de emisión de humo, partículas, CO, SO₂ y NO_x de los equipos de combustión de calentamiento indirecto se establecen en función de la capacidad térmica nominal del equipo, el tipo de combustible, la ubicación de la fuente fija y las condiciones de referencia.

Los equipos pertenecientes a la central termoeléctrica de interés tienen más de 30 años de antigüedad y son equipos de gran capacidad, por lo que los valores con los que deben cumplir se indican en la tabla 2.2, sólo para ZC.

Tabla 2. 2 Niveles de emisión permisibles para los equipos de la CTFPR establecidos en la NOM-085-SEMARNAT-2011.

Capacidad térmica nominal del equipo (GJ/h)	Tipo de combustible	Humo # de mancha	Partículas (mg/m ³)	Bióxido de azufre (ppm v)	Óxidos de nitrógeno (ppm v)	Monóxido de carbono (ppm v)
Mayor de 530 (Más de 15 000 CC)	Sólido y Líquido	NA	250	600	110	400
	Gaseoso	NA	NA	NA	110	450

- Para el caso de partículas, SO₂, NO_x y CO los límites se establecen como concentraciones en volumen y base seca, en condiciones de referencia de 25 °C, 101 325 Pa (1 atm) y 5% de O₂.

- Para NO_x, las ZC se consideran como Resto del País (375 ppm).

-NA= No Aplica

En la norma también se indican las características de los diferentes combustibles utilizados por fuentes fijas, sin embargo solo se presentan las características de los combustibles de interés (tabla 2.3):

Tabla 2. 3 Características de los combustibles de interés establecidas en la NOM-085-SEMARNAT-2011.

Combustible	Poder calorífico (MJ/kg)	Peso específico (kg/l)	Componentes principales (%)			FE SO ₂	F _d (m ³ /G)
			S	N	Agua		
Gas Natural	52	-	-	-	-	≈0	326
Combustóleo pesado	42	1.000 ⁽³⁾	4.0 ⁽¹⁾	Informar ⁽²⁾	1.0 ⁽¹⁾	80	339

F_d: Volumen de productos de la combustión por GJ de energía en el combustible, m³/GJ en condiciones de referencia: base seca, 25°C, 1 atm y 5% de O₂.

FE SO₂: Factor de emisión de SO₂ del combustible g/kg.

(1) NOM- 086-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005.

(2) Informar el contenido de nitrógeno del combustóleo utilizado.

(3) Hoja técnica de especificaciones de Pemex- Refinación.

NOM-086-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005 (Publicada en Enero 2006) – Especificaciones de los combustibles fósiles para la protección ambiental (SEMARNAT-SENER-SCFI, 2005).

Para el caso de combustóleo, las principales características se presentan en la tabla 2.4:

Tabla 2. 4 Características básicas del combustóleo establecidas en la NOM-086-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005.

COMBUSTIBLE		Combustóleo
Propiedad	Método de prueba	
Temperatura de inflamación (°C)	Temperatura de inflamabilidad: Prueba de Pensky- Martens, de copa cerrada (ASTM 093-02 ^a).	66 mínimo
Temperatura de escurrimiento(°C)	Punto de fluidez de productos (ASTM 097-05 ^a).	15 máximo
Viscosidad cinemática (cSt)	Viscosidad cinemática de líquidos transparentes y opacos (Cálculo de viscosidad dinámica) (ASTM 0445-04e2).	1008 a 1166 a 50°C
Azufre % peso (ppm _p)	Azufre en productos de petróleo por espectroscopia de fluorescencia de rayos X por dispersión de energía (ASTM D 4294-03). Determinación de azufre total en hidrocarburos ligeros (ASTM D 5453-05).	4 máximo
Poder Calorífico (MJ/kg)	Estimación de calor neto y bruto de combustión de combustibles diesel para quemadores.	40 mínimo
Agua y Sedimento (% volumen)	Agua y sedimentos en combustibles de destilación media por centrifugado. (ASTM D 2709-06 (2001) e1).	1 máximo

En el caso del gas natural existe una norma que indica las especificaciones que se deben considerar.

NOM-001-SECRE-2010 (Publicada en Marzo 2010)-Especificaciones del gas natural (SECRE, 2010). Las principales características se presentan en la tabla 2.5.

Tabla 2. 5 Características del Gas Natural establecidas en la NOM-001-SECRE-2010.

Propiedad	Unidades	Especificaciones para el resto del país.
Metano (CH ₄)-mínimo	%vol	84.00
Oxígeno (O ₂)-máximo	%vol	0.2
Bióxido de Carbono (CO ₂)-máximo	%vol	3.00
Nitrógeno (N ₂)-máximo	%vol	4.00
Nitrógeno. Variación máxima diaria	%vol	±1.5
Total de inertes(CO ₂ y N ₂)-máximo	%vol	4.00
Etano-máximo	%vol	11.00
Temperatura de rocío de hidrocarburos-máximo	K(°C)	271.15(-2)
Humedad (H ₂ O)- máximo	mg/m ³	110.00
Poder calorífico superior- mínimo	MJ/m ³	37.3
Poder calorífico superior-máximo	MJ/m ³	43.6
Ácido sulfhídrico(H ₂ S)-máximo	mg/m ³	6.00
Azufre total (S)-máximo	mg/m ³	150.00

Para evaluar la calidad del aire de los contaminantes criterio, existe una Norma Oficial Mexicana, estas normas se encuentran indicadas en la tabla 2.6 (SSA, 1993; SSA, 1993; SSA, 1993; SSA, 2010, SSA, 2014):

Tabla 2. 6 Normas para calidad del aire de los diferentes contaminantes criterio.

Contaminante	Norma	Nombre	Límites Máximos Permisibles*
SO ₂	NOM-022-SSAI-2010	Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al bióxido de azufre (SO ₂). Valor normado para la concentración de bióxido de azufre (SO ₂) en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población.	Promedio de 24 horas: 288 µg/m ³ o 0.11 ppm una vez al año. Promedio anual: 66µg/m ³ o 0.025 ppm Promedio horario: 524 µg/m ³ o 0.200 ppm no rebasado dos veces al año.
Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	NOM-023-SSA1-1993	Criterios para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al bióxido de nitrógeno (NO ₂). Valor normado para la concentración de bióxido de nitrógeno (NO ₂) en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población.	395 µg/m ³ o 0.21 ppm una hora una vez al año.
CO	NOM-021-SSA1-1993	Criterios para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al Monóxido de carbono (CO). Valor permisible para la concentración de monóxido de carbono (CO) en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población.	12,595 µg/m ³ o 11.00 ppm en promedio móvil de ocho horas una vez al año.

Contaminante	Norma	Nombre	Límites Máximos Permisibles*
Partículas (PST, PM ₁₀ y PM _{2.5})	NOM-025-SSA1-2014	Salud ambiental. Valores límite permisibles para la concentración de partículas suspendidas PM ₁₀ y PM _{2.5} en el aire ambiente y criterios para su evaluación.	PM ₁₀ : 75 µg/m ³ promedio de 24 horas. 40 µg/m ³ promedio anual. PM _{2.5} : 45 µg /m ³ promedio de 24 horas. 12 µg/m ³ promedio anual.
Pb	NOM-026-SSA1-1993	Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al plomo (Pb). Valor normado para la concentración de plomo (Pb) en el ambiente como medida de protección a la salud de la población.	Promedio de 3 meses: 1.5 µg /m ³

*Todos los resultados se deben referir a condiciones de referencia (25°C y 1 atm)

La Organización Mundial de la Salud (OMS) tiene diferentes niveles de exposición para evitar efectos adversos a la salud, para los siguientes contaminantes (tabla 2.7):

Tabla 2. 7 Límites máximos permisibles de contaminantes criterio, establecidos por la OMS.

Contaminante	Límites máximos permisibles
SO ₂	20 µg/m ³ , media de 24 horas 500 µg/m ³ , media de 10 minutos
NO ₂	40 µg/m ³ , media anual 200 µg/m ³ , media de una hora

Contaminante	Límites máximos permisibles
Partículas (PST, PM ₁₀ y PM _{2.5})	10 µg/m ³ , media anual
	PM _{2.5} 25 µg/m ³ , media de 24 horas
	PM ₁₀ 20 µg/m ³ , media anual
	50 µg/m ³ , media de 24 horas

Fuente: (OMS, 2006).

Dentro de la investigación se incluyen los gases de efecto invernadero, los cuales cobran importancia por su contribución al cambio climático. México ha sido participe de diversos convenios y organizaciones a nivel internacional, los cuales se mencionan a continuación:

- * Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (Firmada en 1992).
- * Protocolo de Kioto (Firmado en 1995).
- * Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (Creado en 1988).
- * Coalición del Clima y Aire Limpio para Reducir los Contaminantes Climáticos de Vida Corta (CCAC) (Creada en 2012).

En México se han desarrollado las siguientes herramientas en materia de cambio climático:

- Ley General de Cambio Climático (Publicada en DOF en Junio 2010).

La cual tiene por objeto garantizar un ambiente sano, regular las emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero, regular las acciones para la mitigación y adaptación al cambio climático, así como reducir la vulnerabilidad de la población y los ecosistemas frente a los efectos adversos del cambio climático (DOF, 2012).

- Estrategia Nacional de Cambio Climático (Primera Edición 2013).

Es un instrumento para enfrentar los efectos del cambio climático en mediano y largo plazo, para poder transitar a una economía competitiva, sustentable y de bajas emisiones de carbono. Incluye la adaptación a los efectos adversos y el desarrollo bajo en emisiones.

Además el Estado de Hidalgo, lugar donde se encuentra ubicada la central termoeléctrica de interés, cuenta con la siguiente legislación aplicable en materia de cambio climático:

- Ley de Mitigación y Adaptación ante los efectos del cambio climático para el Estado de Hidalgo (Publicada en Agosto 2013).

En esta Ley se promueve el desarrollo de información sobre la vulnerabilidad del estado de Hidalgo, así como los impactos potenciales y el desarrollo de estrategias para la mitigación y adaptación ante los posibles cambios producidos por el cambio climático.

- Programa Estatal de Acción ante el Cambio Climático de Hidalgo (Publicada en 2013).

Este documento tiene como principal objetivo el diseño e implementación del programa de acción estatal para hacer frente al cambio climático (SEMARNATH, UAEH; 2013).

Las herramientas mencionadas anteriormente no contemplan límites máximos permisibles de emisión de gases de efecto invernadero para centrales termoeléctricas, sin embargo, se contempla la participación del sector energético en las medidas de mitigación y adaptación establecidas ante los efectos del cambio climático, entre estas medidas destacan las siguientes:

Constituir un sistema de incentivos que promueva la generación de electricidad por medio de energías renovables por parte de la CFE. Logrando alcanzar para el año 2024, al menos un 35% del total de la energía generada.

Implementación de políticas para el incremento en la generación de electricidad mediante tecnologías limpias, en un 35% en un periodo de 10 años; y al menos un 50% de la generación total de energía en un periodo de 40 años.

Además implican la reducción de emisiones nacionales paulatinamente hasta llegar a reducir en un 50% las emisiones con respecto al año 2000, esto en un periodo de 40 años.

En cuanto a emisiones de contaminantes tóxicos orgánicos e inorgánicos, México no cuenta con legislación ambiental aplicable en materia de límites máximos permisibles de emisión por fuentes fijas. Sin embargo, es común tomar como referencia los valores de la US-EPA, esta dependencia tiene como herramienta el “Integrated Risk Information System” (IRIS) creado en 1985, en donde se establecen los límites de algunos contaminantes tóxicos por inhalación, definiendo las unidades de toxicidad de la siguiente manera:

IUR: Unidad de Riesgo por Inhalación. Es una estimación del aumento de riesgo de cáncer a partir de la exposición por inhalación a una concentración de 1 mg/m^3 para toda la vida (Cancerígeno).

RfC: Concentración de inhalación de referencia. Es la concentración de una sustancia química que se respira todos los días durante toda la vida que no se anticipa que cause efectos nocivos para la salud (no cancerígeno).

La tabla 2.8 muestra los valores de toxicidad para contaminantes tóxicos orgánicos:

Tabla 2. 8 Valores de toxicidad para contaminantes tóxicos orgánicos (información obtenida del IRIS).

Nombre de la sustancia química	Tipo de evaluación	Valor de toxicidad
Benceno	No cancerígeno	$3 \times 10^{-2} \text{ mg/m}^3$ (RfC)
	Cancerígeno	2.2×10^{-6} por $\mu\text{g/m}^3$ (IUR)

Nombre de la sustancia química	Tipo de evaluación	Valor de toxicidad
	Cancerígeno	7.8×10^{-6} por $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (IUR)
Formaldehído	Cancerígeno	1.3×10^{-5} por $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (IUR)
Tolueno	No cancerígeno	5 por mg/m^3 (RfC)

La tabla 2.9 muestra los valores de toxicidad para contaminantes tóxicos inorgánicos.

Tabla 2. 9 Valores de toxicidad para contaminantes tóxicos inorgánicos (información obtenida del IRIS).

Nombre de la sustancia química	Tipo de evaluación	Valor de toxicidad
Arsénico	Cáncer	4.3×10^{-3} por $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (IUR)
Berilio	Cáncer	2.4×10^{-3} por $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (IUR)
	No cancerígeno	2×10^{-5} por mg/m^3 (RfC)
Cadmio	Cáncer	1.8×10^{-3} por $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (IUR)
Cromo VI	No cancerígeno	1×10^{-4} mg/m^3 (Partículas cromo VI) (RfC)
	Cáncer	1.2×10^{-2} por $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (IUR)
	No cancerígeno	8×10^{-6} mg/m^3 (Nieblas acidas de cromo y aerosoles disueltos de Cr(VI)) (RfC)
Manganeso	No cancerígeno	5×10^{-5} mg/m^3 (RfC)
Mercurio	No cancerígeno	3×10^{-4} mg/m^3 (RfC)

2.6 Emisiones a la atmósfera en centrales termoeléctricas

El proceso de generación de electricidad contribuye en gran medida al total de las emisiones del país, los principales contaminantes emitidos son SO_2 , CO_2 , mercurio (Hg) y NO_x .

En el caso de México el sector de generación de electricidad contribuye en un 55% a las emisiones totales de SO_2 , 27% de NO_x , 30% de CO_2 y 3% de las emisiones de Hg (Miller et al., 2002).

A nivel nacional dentro de la categoría de generación, transmisión y distribución de energía eléctrica en el Inventario Nacional de Emisiones del 2008, este sector contribuye 68,949.54 ton de PM_{10} , 58,271.17 ton de $\text{PM}_{2.5}$, 1, 053,028.61 ton de SO_2 , 72,404.62 ton de CO, 337,810.85 ton de NO_x y 7,690.90 ton de COV (SEMARNAT, 2008).

Además de los contaminantes antes mencionados, también los gases de efecto invernadero cobran importancia por la contribución de este sector al total de las emisiones nacionales. En el 2013, el sector de generación eléctrica contribuyó con el 19% de las emisiones totales de gases de efecto invernadero (INECC, 2013).

Dentro del Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero del 2013, se indica que en el sector de generación eléctrica, las termoeléctricas (que funcionan con combustóleo, diésel y gas natural), emitieron 33,893.126 Gg de CO_2 , 37.261 Gg de CH_4 y 79.714 Gg de N_2O (INECC, 2013).

Cuando la combustión de hidrocarburos es completa, se producen CO_2 y agua. Sin embargo, existe una porción en los materiales quemados que no es combustible o lo es parcialmente, por lo tanto se generan otros contaminantes como el CO e hidrocarburos parcialmente oxidados. Además los combustibles pueden tener otras sustancias que al oxidarse producen contaminantes atmosféricos como óxidos de azufre, NO_x , sustancias como dioxinas y furanos, formaldehído y compuestos orgánicos policíclicos, así como algunas impurezas de metales como Hg y cadmio(Cd) (Zuk et al., 2006).

2.7 Emisiones a la atmósfera por parte de la Central Termoeléctrica de interés.

La Central Termoeléctrica “Francisco Pérez Ríos” emite diferentes contaminantes derivados de la combustión de combustóleo, los principales contaminantes y su emisión durante el año 2011 se presentan en la tabla 2.10 (CCA, 2011):

Tabla 2. 10 Emisiones de contaminantes generados por la Central Termoeléctrica Francisco Pérez Ríos.

Contaminante	Cantidad en toneladas	Tasa de emisión kg/MW-h
Partículas Suspendidas Totales	8506.79	0.973
PM ₁₀	5803.943	0.664
PM _{2.5}	4241.228	0.485
SO ₂	132374.302	15.142
NO _x	10973.314	1.255
Hg	0.026	0.003
CO ₂	6201080.064	709.347
CH ₄	74.664	0.009
N ₂ O	36.4	0.004

Fuente: Emisiones Atmosféricas de las Centrales Eléctricas en América del Norte, Comisión para la Cooperación Ambiental. Octubre 2011.

Como se observa en la tabla 2.10 los contaminantes que más se emiten son el CO₂ y SO₂, el primero por ser el principal producto de la combustión y el segundo por el alto contenido de azufre del combustible.

La CTFPR reporta sus emisiones al Registro Nacional de Emisiones y Transferencia de Contaminantes (RETC), en donde se reportan datos de contaminantes emitidos al ambiente, con la finalidad de proponer políticas eficaces para preservar y proteger el medio ambiente. Las emisiones al aire reportadas por esta central se presentan en la tabla 2.11:

Tabla 2. 11 Emisiones generadas por la central termoeléctrica de interés reportados en el RETC.

Nombre	Estado	Sector	Nombre de Sustancias	Unidad	Emisiones aire	Disposición final
Central Termoeléctrica Francisco Pérez Ríos	Hidalgo	Generación de energía eléctrica	Cd	Kg/año		1.375
			Hg	Kg/año		0.471
			CO ₂	Ton/año	5758677.7	
			NO ₂	Kg/año	4437860	

2.8 Contaminantes a evaluar

Para poder realizar una comparación entre los contaminantes atmosféricos emitidos con ambos combustibles (combustóleo y gas natural), se seleccionaron los FE disponibles en los documentos de la US-EPA, descartando aquellos para los que no se cuenta con información de alguno de los dos combustibles, los contaminantes se dividieron en 4 grupos principales:

1.-Contaminantes criterio

- * SO₂
- * NO_x
- * CO
- * Pb
- * Partículas totales

2.-Gases de efecto invernadero

- * Óxido nitroso (N₂O)
- * CO₂
- * CH₄

3.-Contaminantes tóxicos orgánicos

- * COT
- * Benceno
- * Formaldehído
- * Tolueno

3.1.-Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos

- * Acenafteno
- * Acenaftileno
- * Antraceno
- * Benzo(a)antraceno
- * Benzo(b,k)fluoranteno
- * Benzo(g,h,i)perileno
- * Criseno
- * Dibenzo(a,h)antraceno
- * Fenantreno
- * Fluoranteno
- * Fluoreno
- * Indeno(1,2,3-cd)pireno
- * Naftaleno
- * Pireno

4. Contaminantes tóxicos inorgánicos

- * Arsénico
- * Bario
- * Berilio
- * Cadmio
- * Cromo
- * Cobalto
- * Cobre
- * Manganeso
- * Mercurio
- * Molibdeno
- * Níquel
- * Selenio
- * Vanadio
- * Zinc

A continuación se describen las principales características de cada uno de estos contaminantes, algunos de los posibles efectos tanto en la salud como en el medio ambiente.

2.8.1 Contaminantes criterio

El término, "contaminante criterio" se deriva de la necesidad de la US-EPA por describir las características de estos contaminantes y sus posibles efectos en la salud y bienestar de la población. La US-EPA ha identificado y establecido normas de calidad del aire para proteger la salud humana y el bienestar, para los seis contaminantes que son: ozono, CO, partículas, SO₂, plomo y óxidos de nitrógeno (US-EPA, 2016).

Los contaminantes criterio se han identificado como perjudiciales para la salud y el bienestar de los seres humanos. Se les llamó así porque fueron objeto de evaluaciones publicadas en documentos de calidad del aire en los Estados Unidos, con el objetivo de establecer niveles permisibles que protegieran la salud, el medio ambiente y el bienestar de la población (INECC, 2013).

Para fines de esta investigación sólo se estimarán las emisiones de los cinco contaminantes primarios que son emitidos directamente desde la fuente, en el caso de ozono, por ser un contaminante secundario no se emite desde la fuente.

*** Dióxido de Azufre**

El SO₂ es el principal contaminante generado por el proceso de combustión de combustibles fósiles en plantas generadoras de electricidad, principalmente en plantas que utilizan combustóleo por el alto contenido de azufre. Es hidrosoluble y al hidrolizarse da lugar a ácidos.

Principalmente irrita el tracto respiratorio y los ojos, disminuye las funciones pulmonares, causa agravamiento del asma y bronquitis crónica (Carbajal, 2010). Inflama el sistema respiratorio provocando tos y secreción mucosa.

Una de las características del SO₂ es que es hidrosoluble, por lo que al entrar en contacto con el agua forma ácido sulfúrico, que es precursor de la lluvia ácida.

* **Óxidos de Nitrógeno**

Los óxidos de nitrógeno son un grupo de gases que contienen oxígeno y nitrógeno en diferentes proporciones, principalmente son el dióxido de nitrógeno y el óxido nítrico. Su principal característica es que son inodoros e incoloros. El NO₂ es un líquido a temperatura ambiente, a temperaturas por encima de los 70 °F es un gas pardo-rojizo.

Se ha demostrado que en la mayoría de los sistemas de combustión de combustibles fósiles, alrededor del 95% de las emisiones de NO_x son en forma de óxido nítrico (US-EPA, 1998).

La US-EPA regula sólo el dióxido de nitrógeno (NO₂) como un suplente para esta familia de compuestos porque es la forma más predominante de NO_x en la atmósfera generada por actividades antropogénicas (US- EPA, 1999).

Dentro de los óxidos de nitrógeno sólo el NO₂ es considerado un contaminante criterio.

Los bajos niveles de óxidos de nitrógeno en el aire pueden irritar los ojos, la nariz, la garganta y los pulmones, causando tos, falta de aliento, cansancio y náuseas.

La exposición a niveles altos puede causar ardor, espasmos e hinchazón en la garganta, acumulación de líquido en los pulmones y la muerte. Si los óxidos de nitrógeno entran en contacto con la piel u ojos, en grandes concentraciones, se pueden experimentar graves quemaduras.

Los óxidos de nitrógeno se descomponen rápidamente en la atmósfera al reaccionar con otras sustancias en el aire.

Al igual que el dióxido de azufre, los óxidos de nitrógeno reaccionan para formar ácido nítrico (HNO₃), el cual participa en la formación de lluvia ácida.

Uno de los principales problemas que se presenta con la presencia del NO₂ en la atmósfera, es que actúa como un precursor de ozono y propicia las condiciones de mala calidad del aire.

* **Monóxido de Carbono**

El monóxido de carbono (CO) es un gas incoloro, inodoro, sin sabor y no irritante.

Es un gas tóxico que al ser inhalado entra en el torrente sanguíneo e impide que entre oxígeno al organismo, lo cual podría causar daños en los tejidos y producir la muerte (US-EPA, 1997).

A niveles moderados de exposición el monóxido de carbono puede ocasionar, mareos, dolores de cabeza, náuseas, confusión mental o desmayos, dependiendo del tiempo de exposición.

A bajos niveles, el CO puede causar falta de aliento, náusea y mareos ligeros, y puede afectar la salud después de un tiempo.

El monóxido de carbono entra en el aire permaneciendo aproximadamente dos meses. Al entrar en el aire se degrada al reaccionar con otras sustancias químicas, transformándose en anhídrido carbónico.

Al entrar en contacto en el suelo ocurre la degradación por parte de los microorganismos, convirtiéndolo a anhídrido carbónico (ATSDR, 2009).

* **Plomo**

Es un metal natural de color gris azulado que se encuentra en pequeñas cantidades en la corteza terrestre.

Debido a la toxicidad del plomo, afecta el sistema nervioso central en las personas. Puede causar debilidad en los dedos, muñecas y tobillos. También causa pequeños aumentos de la presión arterial y puede causar anemia (ATSDR, 2007).

Si la exposición es a niveles altos de plomo puede afectar severamente el cerebro y los riñones y en última instancia ocasionar la muerte. En mujeres embarazadas puede causar aborto involuntario.

Al emitirse plomo al aire, este viaja antes de ser depositado en el suelo, pudiendo afectar aguas subterráneas, dependiendo de las características del suelo y del compuesto de plomo.

* **Partículas**

Las partículas son una mezcla de compuestos microscópicos o muy pequeños que se encuentran suspendidos en el aire en estado sólido o líquido. Pueden variar en tamaño, forma y composición dependiendo del origen de las mismas (Rojas et al., 2007).

Los efectos en la salud que produce este contaminante dependen del tamaño de las partículas, las partículas más finas son evidentemente más perjudiciales debido a que pueden penetrar en los pulmones e incluso en el torrente sanguíneo.

Algunos de los problemas de salud ocasionados por la contaminación por partículas son:

- Muerte prematura de personas con enfermedad cardíaca, ataques cardíacos, latidos irregulares del corazón y asma agravada.
- Disminución de la función pulmonar, irritación de las vías respiratorias, tos o dificultades para respirar.

Las partículas pueden causar un deterioro en la visibilidad como la niebla.

Estas partículas son arrastradas grandes distancias por el viento, para luego depositarse en el suelo o el agua.

2.8.2 Gases de efecto invernadero (GEI)

Parte de la radiación solar que llega a la Tierra penetra a la superficie, mientras que el resto es reflejada por la atmósfera o absorbida por gases o partículas, la energía que alcanza la superficie calienta el suelo y cuerpos de agua, los cuales liberan calor en forma de radiación infrarroja. Los gases de efecto invernadero absorben parte de la radiación producida por la Tierra y la envían en todas

direcciones, ocasionando el calentamiento de la superficie de la Tierra (Rodríguez et al., 2009).

El mecanismo principal se muestra en la figura 2.2:



Figura 2. 2 Mecanismo de efecto invernadero.

Fuente: Gentile G, Thiel I, (2006) El cambio climático y como mitigarlo. Instituto de estudios e investigaciones sobre el Medio Ambiente. Argentina (Adaptación de Imagen).

Los principales GEI son: vapor de agua, CO₂, CH₄, óxido nitroso (N₂O) y ozono.

El CO₂ es uno de los más importantes GEI, por las altas concentraciones de este contaminante en la atmósfera, el CH₄ causa efectos 20 veces más fuertes que el CO₂, mientras que el N₂O es 200 veces más fuerte comparado con el CO₂(Cârdu, Baica, 2002).

México ha desarrollado diferentes herramientas políticas para reducir la emisión de GEI y contribuir al cambio climático global, entre estas herramientas destacan: La aprobación de la Ley General del Cambio Climático, la Estrategia Nacional de Cambio Climático Visión 10-20-40, el Programa Especial de Cambio Climático 2014-2018 y el Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto invernadero; así como la instalación de la Comisión Intersecretarial de

Cambio Climático, el Consejo de Cambio Climático y el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.

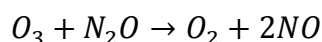
En todas estas herramientas se indican las estrategias de mitigación priorizando la reducción de emisiones al menor costo y que, brinden co-beneficios de salud y bienestar para la población.

* **Óxido nitroso**

Es un gas volátil, incoloro, de olor dulce y ligeramente tóxico. Químicamente es considerado un gas estable, no reacciona con otros compuestos ni elementos.

La vía de administración de óxido nitroso es pulmonar, la inhalación puede producir asfixia y consecuentemente la muerte. Su mecanismo consiste en llegar al cerebro y disminuir la actividad de las neuronas, puede generar pérdida de conciencia, amnesia o excitación, y llegar a causar un estado de coma y la muerte al afectar al sistema respiratorio; dependiendo de la concentración y el tiempo de exposición (PRTR-España, 2007).

Se le atribuye un efecto negativo al atacar la capa de ozono, ya que al estar en contacto con el O_3 reacciona de la siguiente manera:



Se le atribuye un efecto sobre el cambio climático por su alto potencial de calentamiento que es de 310 (SEMARNAT, INE, 2006).

* **Dióxido de carbono**

Es un gas incoloro e inodoro con un ligero sabor ácido.

Es una sustancia asfixiante, en forma gaseosa. La exposición a bajas concentraciones puede causar daños en el sistema nervioso central, lesiones en la vista, congestión pulmonar, contracciones musculares, hipertensión arterial, dificultad para respirar, mareo, dolor de cabeza, fatiga, pérdida de memoria, náuseas, vómito, confusión y quemaduras en la piel. La exposición a altas

concentraciones puede causar la muerte, pérdida del conocimiento o convulsiones (National Library of Medicine, 2005).

Un incremento en la cantidad de CO₂ genera un incremento de gases de efecto invernadero lo que provoca que se absorba una mayor cantidad de calor provocando el derretimiento de hielo en los polos y un aumento en el nivel del mar.

* **Metano**

Es el hidrocarburo más simple cuya fórmula química es CH₄. Se presenta en forma de gas a temperatura y presión ordinaria, es incoloro, no tóxico e inflamable.

Al inhalar esta sustancia puede causar asfixia, pérdida de conocimiento e incluso la muerte. El contacto con el líquido o gas comprimido puede ocasionar congelamiento.

Es uno de los compuestos a los cuales se les atribuye el calentamiento global a causa del efecto invernadero. Puede ocasionar un incendio debido a su alta inflamabilidad.

El potencial de calentamiento de este contaminante a 100 años ha sido estimado en 33 veces más que la cantidad equivalente de CO₂ (CCA-UNAM, MCE2., 2010).

2.8.3 Contaminantes tóxicos orgánicos

Los contaminantes tóxicos del aire son sustancias venenosas en el aire que provienen de fuentes naturales o de fuentes antropogénicas, y pueden dañar el ambiente y la salud (US-EPA, 2016).

* **Compuestos orgánicos totales**

Los compuestos orgánicos totales incluyen todos los compuestos carbonados con excepción de los carbonatos, carburos metálicos, monóxido y dióxido de carbono, así como el ácido carbónico (INE, 2005).

También son conocidos como gases orgánicos totales o hidrocarburos totales.

La exposición a estos compuestos por un periodo corto puede producir irritación en el tracto respiratorio, mientras que las exposiciones más prolongadas pueden causar algún tipo de cáncer.

Los efectos en el ambiente van a depender del tipo de compuesto orgánico del que se hable, dependiendo de la persistencia en el ambiente y su toxicidad.

* **Benceno**

Es un líquido incoloro con un olor dulce. Se evapora en el aire rápidamente y es poco soluble en agua. Además es altamente inflamable.

Afecta el sistema inmune y el nervioso. La exposición breve de altos niveles de benceno en el aire puede ocasionar la muerte (10,000-20,000 ppm). A niveles más bajos entre 700-3,000 ppm puede causar somnolencia, mareos, taquicardia, dolor de cabeza, temblores, confusión y pérdida del conocimiento. A si mismo puede causar problemas en la sangre (ATSDR, 2007).

Los niveles de benceno en el aire pueden ser elevados por las emisiones de la quema de carbón y petróleo, las operaciones de desecho y almacenamiento de benceno, gases de los vehículos de motor y evaporación de las estaciones de servicio de gasolina.

El benceno puede pasar al aire desde la superficie del suelo y el agua, una vez en el aire reacciona con otras sustancias químicas y se degrada en pocos días. También se puede depositar en el suelo por la lluvia o la nieve.

* **Formaldehído**

Es un gas incoloro, inflamable y de olor característico.

Pequeñas cantidades de formaldehído se emiten naturalmente por plantas, animales y seres humanos.

Afecta principalmente el aparato digestivo, el sistema inmune, el aparato respiratorio y la piel.

Al respirar una concentración de 0.1 se observa irritación nasal y ocular, ardor en la garganta, tos y náuseas (INC, 2016).

Cuando el formaldehído está en el aire se degrada rápidamente. En contacto con el agua se disuelve con facilidad. Se evapora de suelos pocos profundos.

Los productos de descomposición del formaldehído son ácido fórmico y monóxido de carbono.

*** Tolueno**

El tolueno es un líquido claro, incoloro con un olor característico.

Las principales afectaciones causadas por el tolueno son en el sistema nervioso. A bajos niveles de exposición puede causar cansancio, debilidad, confusión, pérdida de memoria y náuseas.

Si la exposición se da a niveles altos puedes sentirte mareado, causar pérdida del conocimiento e incluso la muerte (ATSDR, 2000).

El tolueno puede afectar el ambiente cuando se utilizan materiales que lo contienen, puede entrar en aguas superficiales y subterráneas por derrames. Si los productos que contienen tolueno se colocan en rellenos sanitarios o vertederos pueden penetrar en el suelo (ATSDR, 2000).

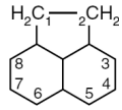
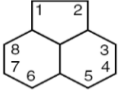
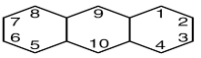
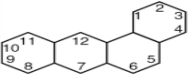
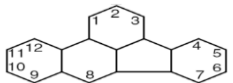
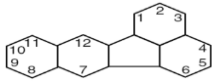
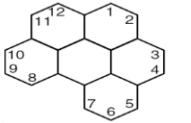
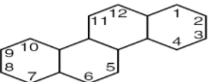
* **Hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs)**

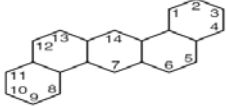
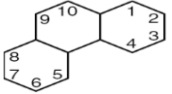
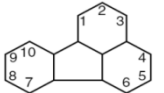
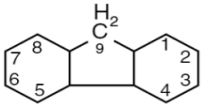
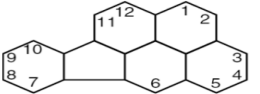
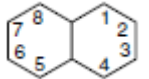
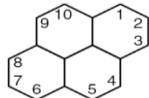
Es un grupo de sustancias químicas. Se encuentran generalmente como mezclas complejas. Como sustancias químicas puras son sólidos incoloros, blancos o verdes amarillosos pálidos, tienen un olor leve. Son más de cien sustancias químicas las consideradas dentro de esta clasificación, sin embargo para efectos de la presente investigación los contaminantes seleccionados fueron:

- | | |
|---------------------------|-----------------------------|
| * Acenafteno | * Dibenzo (a,h) antraceno |
| * Acenaftileno | * Fenantreno |
| * Antraceno | * Fluoranteno |
| * Benzo(a) antraceno | * Fluoreno |
| * Benzo (b,k) fluoranteno | * Indeno (1,2,3- cd) pireno |
| * Benzo (g,h,i) perileno | * Naftaleno |
| * Criseno | * Pireno |

La tabla 2.12 muestra las características de los hidrocarburos aromáticos policíclicos seleccionados para este estudio.

Tabla 2. 12 Características de los hidrocarburos aromáticos policíclicos.

Hidrocarburos aromáticos policíclicos	Estructura	Peso Molecular	Solubilidad en agua (mg/L)	Presión de vapor (Pa)	Punto de ebullición (°C)
Acenafteno		154	3.9	3.0×10^{-2}	279
Acenaftileno		152	3.90	9.0×10^{-1}	280
Antraceno		178	0.05	1.0×10^{-3}	342
Benzo(a) antraceno		228	0.009-0.014	2.8×10^{-5}	400
Benzo (b) fluoranteno		252	0.0014	6.7×10^{-5}	481
Benzo (k) fluoranteno		252	0.0007-0.008	5.2×10^{-8}	480
Benzo (g,h,i)perileno		276	0.00026	1.4×10^{-8}	550
Criseno		228	0.002	1.4×10^{-6}	448

Hidrocarburos aromáticos policíclicos	Estructura	Peso Molecular	Solubilidad en agua (mg/L)	Presión de vapor (Pa)	Punto de ebullición (°C)
Dibenzo(a,h)antraceno		278	0.0005	3.7×10^{-8}	524
Fenantreno		178	1.1	2.0×10^{-2}	340
Fluoranteno		202	0.26	1.2×10^{-3}	375
Fluoreno		166	1.9	9.0×10^{-2}	295
Indeno (1,2,3-cd)pireno		276	0.00019	1.3×10^{-8}	536
Naftaleno		128	32	11	218
Pireno		202	0.13	6.0×10^{-4}	393

Fuente: (Whitacre, 2015).

Las personas expuestas a mezclas que contienen HAPs a través de la respiración o la piel por largos periodos de tiempo pueden contraer cáncer.

La Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC) clasifica los compuestos con base en los siguientes grupos (tabla 2.13).

Tabla 2. 13 Clasificación de compuestos, según la IARC.

Grupo	Clasificación
1	Cancerígeno en humanos
2 ^a	Probable cancerígeno en humanos
2B	Posible cancerígeno en humanos
3	No clasificable como cancerígeno en humanos
4	Probablemente no es cancerígeno en humanos

El dibenzo(a, h,) antraceno es un probable cancerígeno en humanos. En el grupo 2B están el benzo(a)antraceno, benzo(b, k) fluoranteno, criseno, indeno(1,2,3-cd)pireno y naftaleno .El acenafteno, antraceno, benzo(g,h,i)perileno, fenantreno, fluoreno, fluoranteno y pireno entran en el grupo 3.

La US-EPA ha determinado que el benzo(a)antraceno, el benzo(b)fluoranteno, el benzo(k)fluoranteno, el criseno, el dibenzo(a, h)antraceno y el indeno(1,2,3-c,d)pireno son probables carcinógenos humanos y que el acenaftileno, el antraceno, el benzo(g,h,i)perileno, el fluoranteno, el fluoreno, el fenantreno y el pireno no son clasificables como carcinógenos en los seres humanos (ATSDR, 1995).

Los HAPs pueden entrar en el agua a través de descargas de plantas industriales y pueden ser liberados a los suelos de los sitios de desecho de residuos peligrosos por derrame. Su movilización en el ambiente va a depender de las propiedades de cada uno de ellos.

En el aire se encuentran como vapores o adheridos a pequeñas partículas. Pueden degradarse al reaccionar con la luz solar y otras sustancias en el aire.

2.8.4 Contaminantes tóxicos inorgánicos

* **Arsénico**

El arsénico se encuentra de manera natural en el suelo y en los minerales.

En el medio ambiente, este elemento se combina con oxígeno, azufre y cloro para formar compuestos inorgánicos de arsénico, mientras que en plantas y animales se combina con carbono e hidrógeno formando compuestos orgánicos.

Respirar altos niveles de arsénico inorgánico causa dolores de garganta e irritación en los pulmones. La ingestión excesiva causa náuseas, vómitos, disminución en la producción de glóbulos blancos y rojos, ritmo cardiaco anormal y daño en los vasos sanguíneos (ATSDR, 2007).

El respirar durante un tiempo prolongado bajos niveles de arsénico inorgánico causa oscurecimiento en la piel y aparición de callos y verrugas.

El polvo de arsénico puede ser arrastrado por el viento y entrar en contacto con el agua, aire y tierra.

* **Bario**

El bario es un metal blanco plateado que al exponerse al aire se torna de color amarillo-plata.

Los efectos en la salud asociados con la exposición a los compuestos de bario dependen de la solubilidad de los compuestos de bario en agua.

El carbonato de bario no se disuelve en agua, pero si en el estómago por lo que puede causar efectos nocivos en la salud.

Ingerir grandes cantidades de compuestos de bario puede causar cambios en el ritmo cardiaco o parálisis en humanos. Si se ingieren pequeñas cantidades por un periodo muy corto se pueden experimentar vómitos, calambres abdominales, diarrea, aumento o disminución de la presión sanguínea y debilidad muscular.

Algunos estudios demuestran que el estar en contacto con el bario presente en el aire ocasiona daños en los pulmones (ATSDR, 2007).

Algunos compuestos de bario como el cloruro, nitrato o hidróxido de bario se disuelven en agua, se combinan con los sulfatos o carbonatos contenidos en el agua convirtiéndose en sulfato y carbonato de bario.

El sulfato y carbonato de bario se liberan a la tierra, combinándose con las partículas del suelo.

* **Berilio**

Es un metal duro, de color grisáceo que se encuentra naturalmente en las rocas minerales, carbón, suelo y polvo volcánico.

Los efectos que tiene este elemento sobre la salud humana dependen de la cantidad a la que se está expuesto. Si se expone a niveles altos podría generarse una condición aguda parecida a la neumonía.

Si la persona es expuesta a berilio se puede desarrollar una reacción inflamatoria en el sistema respiratorio (ATSDR, 2002).

El polvo de berilio es emitido a la atmósfera por la quema de petróleo y carbón. Este polvo se asienta sobre la tierra y el agua. Algunos compuestos de berilio se disuelven en agua, mientras que otros se adhieren y depositan en el fondo.

* **Cadmio**

Es un elemento natural que se encuentra principalmente como un mineral combinado con otros elementos. Una de sus principales características es que no se puede corroer fácilmente.

El cadmio afecta principalmente los sistemas digestivo, cardiovascular, urinario, respiratorio y reproductivo.

Consumir alimentos o agua contaminados irrita severamente el estómago ocasionando vómitos y diarrea (ATSDR, 2012).

El cadmio es emitido por la minería, la industria, quema de carbón y desechos domésticos, entrando en el suelo, agua y aire. En el suelo las partículas se adhieren fuertemente, mientras que en el agua algunas formas de cadmio se disuelven.

* **Cromo**

Es un elemento natural presente en el ambiente de diferentes formas, en rocas, animales, plantas y suelo. No posee sabor ni olor. Dependiendo de la forma que adopte, puede ser un líquido, sólido o gas.

Este elemento afecta principalmente el sistema inmunológico, renal y respiratorio.

Si se respiran altos niveles de cromo (VI) puede causar irritación a la nariz, secreción nasal, problemas respiratorios como asma y tos. Si el cromo (VI) entra en contacto con la piel puede causar úlceras (ATSDR, 2012).

Algunas personas pueden tener reacciones alérgicas al Cromo (VI) o Cromo (III).

El cromo se puede encontrar en el aire, suelo y agua al ser liberado de la fabricación, uso y eliminación de los productos a base de cromo. Generalmente no permanece en la atmósfera sino que se deposita en el suelo y agua.

* **Cobalto**

Es un elemento natural que se encuentra en las rocas, el suelo, el agua, las plantas y animales.

El cobalto puede beneficiar o perjudicar la salud, puede resultar benéfico ya que es parte de la vitamina B12, pero si la exposición se da a niveles muy altos puede tener efectos en el pulmón, corazón y ocasionar dermatitis (ATSDR, 2004).

Al entrar en contacto con el aire, el cobalto se asocia con partículas que se depositan en el suelo. Si es liberado al agua o al suelo se adhiere a partículas. Ciertos compuestos de cobalto pueden disolverse en agua.

* **Cobre**

El cobre es un metal que se produce naturalmente en rocas, suelo, agua y aire. Es un elemento esencial en las plantas, animales y humanos.

Los niveles altos de cobre pueden ser perjudiciales causando irritación en la nariz y garganta. La ingestión de altos niveles de cobre puede causar náuseas, vómitos y diarrea. En dosis muy elevadas puede causar daños en el hígado, los riñones e incluso la muerte.

El cobre se libera en el medio ambiente mediante la minería, la agricultura y actividades de fabricación. También se libera a partir de volcanes, polvo, vegetación en descomposición e incendios forestales.

Generalmente el cobre liberado se adhiere a partículas de materia orgánica, arcilla, tierra o arena. Los compuestos de cobre pueden descomponerse y liberar cobre en el agua, aire y alimentos (ATSDR, 2004).

* **Manganeso**

El manganeso es un metal natural que se encuentra en las rocas, es de color plata. Se combina con oxígeno, azufre o cloro.

El manganeso en pequeñas cantidades es esencial como nutriente para tener una buena salud.

Al exponerse a altos niveles de manganeso se afecta el sistema nervioso, principalmente ocurren cambios en el comportamiento y movimientos lentos y torpes. La exposición a altos niveles en el aire causa irritación en los pulmones (ATSDR, 2012).

El manganeso puede ser liberado a la atmósfera, suelo y agua por el uso y disposición de productos a base de manganeso. No puede descomponerse en el medio ambiente. En el agua se adhiere a partículas y sedimenta.

* **Mercurio**

El mercurio es un metal natural presente en diferentes formas. El mercurio metálico es un líquido de color blanco-plateado, inodoro y brillante. Al ser calentado es un gas incoloro e inodoro.

El mercurio se combina con otros elementos para formar compuestos orgánicos e inorgánicos de mercurio.

El mercurio afecta principalmente el sistema nervioso. La exposición a altos niveles de mercurio metálico puede causar daño permanente al cerebro, riñones y al desarrollo de fetos. Los principales efectos sobre el funcionamiento del cerebro pueden causar irritabilidad, timidez, temblores, problemas en la visión, audición y memoria.

Cuando la exposición a altos niveles es de corto plazo, los efectos pueden ser náuseas, vómitos, diarrea, daños en los pulmones, aumento de la presión arterial o frecuencia cardíaca, erupciones en la piel e irritación ocular (ATSDR, 1999).

Las principales fuentes de emisión de mercurio al aire son la minería, la quema de carbón, residuos y plantas de fabricación.

Además entra en el agua o el suelo por depósitos naturales, eliminación de desechos y la actividad volcánica.

* **Molibdeno**

Es un metal duro de color blanco-plateado (Texas Department of State Health Services, 2012).

Se considera de baja toxicidad y la evidencia de efectos adversos es limitada. La exposición a altos niveles puede resultar en un incremento en los niveles de ácido úrico y una enfermedad similar a la gota (CDC, 2013).

El molibdeno en el aire se presenta como pequeñas partículas de polvo el cual sedimenta y se fija al suelo.

Cuando llueve parte del molibdeno entra en los cuerpos de agua y puede ser consumido por los peces o sedimentar.

En suelos ácidos se pueden encontrar altos niveles de molibdeno, ya que no se disuelve muy bien en estos suelos.

*** Níquel**

El níquel puro es un metal blanco plateado duro. Puede ser combinado con otros metales para formar aleaciones. El níquel puede combinarse con otros elementos para formar compuestos de níquel, estos compuestos son fácilmente disueltos en agua y son de color verde (ATSDR, 2005).

El níquel y sus compuestos no tienen olor ni sabor característicos.

El principal efecto adverso a la salud es una reacción alérgica. La reacción más común es una erupción en la piel en el sitio de contacto con el níquel. Las personas que trabajan expuestas a níquel han experimentado bronquitis crónica y disminución de la función pulmonar.

Al consumir agua con altas cantidades de níquel se puede generar dolor de estómago y efectos adversos en la sangre y los riñones (ATSDR, 2005).

El níquel es liberado a la atmósfera por las industrias que fabrican o usan níquel, aleaciones de níquel o compuestos de níquel. Otra de las fuentes de emisión son las centrales eléctricas.

En el aire se adhiere a partículas de polvo que se depositan en el suelo, o son removidas del aire por la lluvia o nieve. El níquel liberado en aguas residuales termina en el suelo o sedimentado, donde se une fuertemente a partículas que contienen hierro o manganeso.

* **Selenio**

El selenio es un elemento mineral que se distribuye en la naturaleza en las rocas y suelos. En su estado puro es de color gris metálico con cristales hexagonales de color negro.

El selenio tiene efectos positivos y negativos. A dosis bajas es benéfico para la salud. Sin embargo, la exposición oral de corta duración a altas concentraciones puede causar náuseas, vómitos y diarrea.

La exposición crónica puede producir una enfermedad cuyos síntomas son la pérdida de cabello, fragilidad de uñas y anormalidades neurológicas.

Breves exposiciones a altos niveles en el aire, pueden causar irritación en las vías respiratorias, bronquitis, dificultad para respirar y dolores de estómago.

La exposición a largo plazo puede causar irritación respiratoria, espasmos bronquiales y tos.

El polvo de selenio entra al aire por la quema de carbón y petróleo, este polvo se asienta sobre la tierra y el agua. Algunos compuestos de selenio se disuelven en agua (ATSDR, 2003).

* **Vanadio**

El vanadio es un elemento producido en la naturaleza. A menudo este elemento se encuentra en forma cristales, como un compuesto metálico blanco-gris. El vanadio puro no tiene olor.

Uno de los compuestos de vanadio es el pentóxido de vanadio, que en el aire puede ocasionar daño pulmonar.

Algunos síntomas de personas que han estado expuestas a compuestos de vanadio son: náuseas, diarrea y calambres estomacales (ATSDR, 2012).

Entra en el ambiente a partir de fuentes naturales y de la quema de aceites combustibles, no se disuelve bien en agua. Se combina con otros elementos. Se une fuertemente a los suelos y sedimentos.

* **Zinc**

El zinc puro es un metal brillante de color blanco azulado. Está presente en el aire, suelo y agua, así como en todos los alimentos.

El zinc es un elemento esencial, cantidades muy pequeñas pueden causar problemas, así como el exceso de zinc es perjudicial también.

Grandes dosis ingeridas por vía oral pueden causar calambres estomacales, náuseas y vómitos (ATSDR, 2012). Por un periodo de tiempo más largo puede causar anemia y disminuir los niveles de colesterol bueno.

El zinc en el ambiente proviene de actividades humanas como la minería, la quema de carbón y residuos.

Este elemento se une a los suelos, sedimentos y partículas de polvo desde el aire.

Algunos compuestos de zinc pueden filtrarse al agua subterránea dependiendo del tipo de suelo.

CAPÍTULO 3. DESCRIPCIÓN DEL SITIO DE ESTUDIO

Como sitio de estudio se seleccionó la Central Termoeléctrica “Francisco Pérez Ríos”, ubicada en el municipio de Tula de Allende, Estado de Hidalgo, México.

Tula de Allende se encuentra ubicado entre los paralelos 19° 55' y 20° 11' de latitud norte; los meridianos 99° 15' y 99° 32' de longitud oeste; y la altitud del sitio varía entre 2,100 y 2,700 m (INEGI, 2009).

En cuanto a las características climáticas, el municipio se divide en los siguientes tipos: clima templado subhúmedo con lluvias en verano de baja humedad C (w0) (w), semiseco templado (BS1k) y templado subhúmedo con lluvias en verano de humedad media C (w1) (w) (SEMARNATH, 2001).

La temperatura varía entre los 14 °C a los 18 °C, y el rango de precipitación anual está entre los 500 y 800 mm.

El uso de suelo mayoritariamente corresponde a la agricultura y solo un 11% de la superficie total que es de 305.8 km², corresponde a área urbana.

3.1 Zona crítica Tula-Vito-Asasco

Una zona crítica es aquella que por sus condiciones topográficas y meteorológicas dificulta la dispersión de contaminantes, o aquella en la que se registran altas concentraciones de contaminantes en la atmósfera (SEMARNAT, 2011).

La ZC Tula- Vito-Asasco fue clasificada como tal, en el año de 1989 durante la formulación del Programa Ambiental de México. Esta decisión fue tomada considerando sus características topográficas, meteorológicas y climáticas, demográficas y con base al tipo de actividad industrial; esto es importante porque representa diferentes tipos y cantidad de fuentes emisoras de contaminantes (INECC, 2013).

Esta zona es un corredor industrial ubicado en el Valle del Mezquital, incluye los municipios de Tula de Allende, Tepejí del Río Ocampo, Tlahuelilpan, Atitalaquia, Atotonilco de Tula, Tlaxcoapan y Apasco de Ocampo. Estos municipios pertenecientes a los Estados de Hidalgo y el Estado de México. La figura 3.1 presenta la ZC Tula- Vito- Apasco y su ubicación al norte de la ZMCM. La central termoeléctrica se ubica a aproximadamente 86 km al noreste de la Ciudad de México.

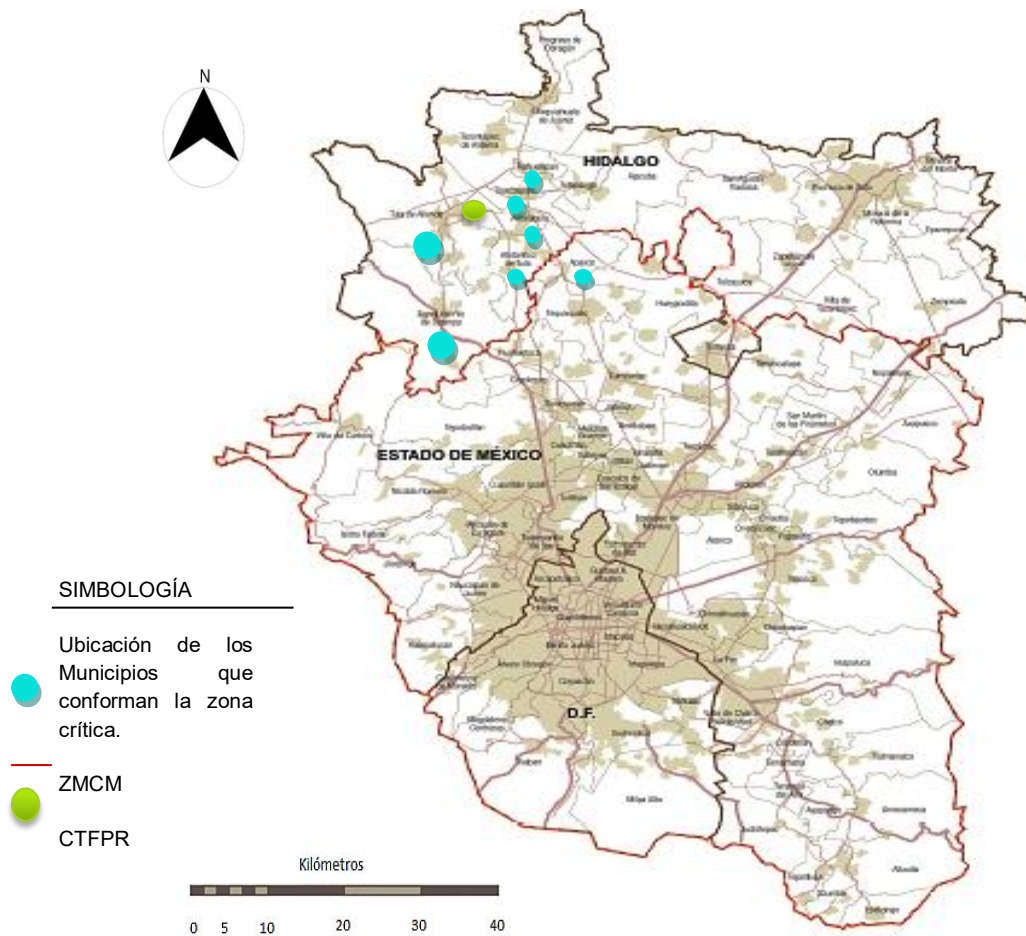


Figura 3. 1 Ubicación de la CTFPR con respecto a los municipios pertenecientes a la ZC Tula- Vito– Apasco y a la Ciudad de México.

Fuente: Gobierno del Distrito Federal, Gobierno del Estado de México, Gobierno del Estado de Hidalgo (2012) (Adaptación de Mapa)

Las principales empresas ubicadas en el corredor industrial pertenecen a los siguientes sectores: energía termoeléctrica, refinería, petroquímica, eléctrico, industrias textiles y cementeras, así como del giro alimenticio, entre otros.

Destacan la Refinería de Petróleos Mexicanos “Miguel Hidalgo”, las cementeras “Cruz Azul”, “Tolteca” y “Apasco”, así como la Central Termoeléctrica “Francisco Pérez Ríos”.

Por sus altos niveles de emisión a la atmósfera los municipios de Tula de Allende y Atotonilco de Tula son los que requieren mayor atención en materia de calidad del aire.

3.2 Central Termoeléctrica “Francisco Pérez Ríos” (CTFPR)

La Central Termoeléctrica “Francisco Pérez Ríos” inició sus operaciones el 27 de septiembre de 1975. Se encuentra ubicada en el kilómetro 27.5 de la carretera Jorobas- Tula, en el municipio de Tula de Allende, Estado de Hidalgo. Se ubica a 86 km al noreste de la Ciudad de México y a 8 km al sur de la Cuidad de Tula.

Actualmente es considerada una de las principales centrales de este tipo de tecnología por su gran capacidad que es de 1545.6 MW. Cuenta con un total de cinco unidades de generación de energía eléctrica con tecnología termoeléctrica.

Las unidades 1, 2 y 5 tienen una capacidad de 300 MW y la configuración de los quemadores es tangencial; mientras que las unidades 3 y 4 cuentan con una capacidad de 322.8 MW y la configuración de sus quemadores es frontal.

Las unidades tienen chimeneas para la emisión de los gases de escape a la atmósfera, la altura de estas chimeneas es de 65 m, el total de chimeneas es de siete, considerando dos chimeneas para las unidades 1 y 2(figuras 3.2 y 3.3).

Se llevó a cabo una visita a la central durante el mes de mayo del 2015, con el fin de observar físicamente las instalaciones, así como presenciar los muestreos en fuente e intercambiar información con el personal del Departamento Ambiental de la Central Termoeléctrica “Francisco Pérez Ríos”.



Figura 3. 2 Unidades 1 y 2 de la Central Termoeléctrica “Francisco Pérez Ríos” vista de las chimeneas de las unidades.



Figura 3. 3 Vista lateral de la Unidad 2, durante la visita de trabajo.

La importancia de esta central se debe a diferentes factores, entre los que destacan los siguientes:

- Ubicación dentro de la zona crítica Tula-Vito-Aspasco: por lo que es una prioridad disminuir la cantidad de emisiones contaminantes para asegurar una mejor calidad del aire y beneficiar la salud de la población afectada.

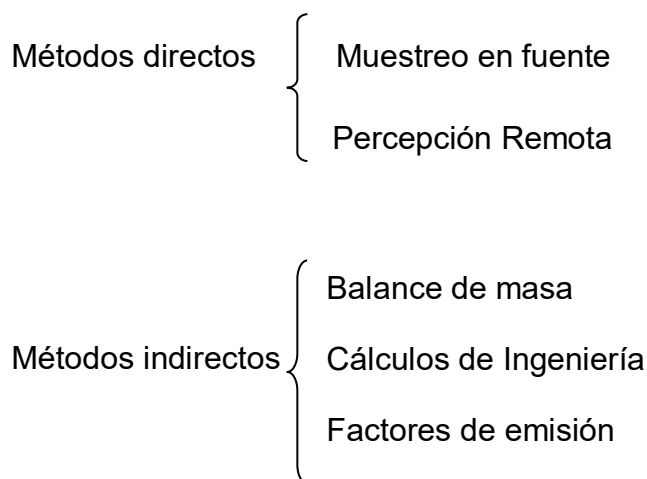
- Cercanía con la Ciudad de México: Los vientos dominantes en la Ciudad de México van de norte a sur, por lo que al estar ubicada al noreste de la ciudad, parte de estos contaminantes se transportan hasta la Ciudad de México. Cabe mencionar que en la ZMCM no se rebasan las normas de calidad del aire para SO₂, sin embargo si se presenta el fenómeno de lluvia ácida y en el año 2010 se tuvieron niveles de sulfatos entre 5 y 20 kg/ ha en las diferentes regiones de la ciudad (Bravo et al., 2015). Existen además otros estudios en donde se ha comprobado que el sector energético ubicado en Tula impacta en la calidad del aire de la Ciudad de México (García, 2008).
- Alta generación de energía eléctrica: A nivel nacional es la central termoeléctrica con mayor cantidad en generación, considerando las 6 unidades de ciclo combinado.
- Conexión con la red de abastecimiento de la Ciudad de México: Por su cercanía con la Ciudad, esta central sirve para abastecer parte de la demanda de electricidad de la Ciudad de México.

La Central Termoeléctrica “Francisco Pérez Ríos” utiliza combustóleo como combustible principal en las unidades de generación, sin embargo actualmente se están gestionando los recursos humanos y económicos para el cambio de combustible a gas natural.

Este cambio se debe principalmente a las altas emisiones de dióxido de azufre, sin embargo debemos recalcar que la sustitución de combustible no es la única alternativa aplicable al problema, la tecnología o medida adecuada va a depender del porcentaje de emisiones que se desea reducir (Islas et al., 2007).

CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA DE ESTIMACIÓN DE EMISIONES

La cuantificación de emisiones provenientes de fuentes fijas se puede realizar mediante métodos directos e indirectos. Los métodos directos se basan en la recolección de información en campo, mientras que los métodos indirectos están basados en la información sobre el comportamiento de ciertos equipos o procesos de interés. Las técnicas de estimación de emisiones, se muestran a continuación:



Muestreo en fuente

El muestreo en fuente nos permite obtener datos confiables de alta precisión. Debido a la complejidad técnica del muestreo en la fuente se requiere de tiempo y equipo para obtener datos de emisiones que sean exactos y válidos para numerosos contaminantes de una fuente (Radian Corporation, 1996).

Percepción Remota

Este método mejor conocido como método óptico de percepción remota, se basa en técnicas espectroscópicas, de manera general consiste en transmitir cierta longitud de onda a la atmósfera y medir la energía absorbida. Con esta metodología se obtienen las concentraciones de contaminantes en tiempo real, con la ventaja de que proporcionan mediciones integradas de multicomponentes a lo largo de una trayectoria en la atmósfera (INE, 2010).

Balance de masa

El uso de este método implica examinar el proceso para determinar si las emisiones pueden estimarse únicamente conociendo los parámetros específicos del proceso, así como los materiales involucrados y su composición.

Para poder aplicar este método es necesario disponer de la información sobre las corrientes de entrada y salida del proceso.

Las entradas del proceso u operación unitaria incluyen materias primas (MP), materiales de consumo indirecto (CI), agua (W) o aire (A); y las salidas incluyen productos (P), emisiones al aire (Ea), emisiones al agua (Ew), y emisiones al suelo (Es); por lo que el balance para una sustancia determinada es (SEMARNAT,2001):

$$MP + CI = P + Ea + Ew + Es$$

Cálculos de Ingeniería

Se basan en la aplicación de principios y criterios de ingeniería correlacionados matemáticamente, como condiciones de equilibrio fisicoquímico y termodinámico de fases, propiedades físicas y químicas de las sustancias, variables y constantes de reacciones químicas, correlaciones y especificaciones de diseño (SEMARNAT, 2001).

Factores de emisión

Para poder utilizar el método de factores de emisión es necesario conocer algunos datos de la fuente como el giro al que pertenece, la actividad, características del equipo, el combustible utilizado, la cantidad del mismo y sus características.

Un factor de emisión es un valor representativo que relaciona la cantidad emitida de un contaminante con una actividad o parámetro asociado al proceso. Usualmente se expresa como el peso de un contaminante dividido entre una unidad de volumen, peso, distancia o duración de la actividad que emite un contaminante.

Tipos de factores de emisión:

Existen dos tipos de factores de emisión, los basados en procesos y basados en censos.

- Los FE basados en procesos se desarrollan a través de la medición directa de las emisiones de contaminantes en procesos específicos. La forma general de expresarlos es la masa emitida del contaminante por unidad de proceso.
- Los factores basados en censos se desarrollan considerando diversas fuentes de emisión, se requiere agruparlas como una fuente de área. El uso de FE basados en censos es un método eficiente para tipos de fuentes emisoras dispersas y numerosas que no se pueden caracterizar rápidamente conociendo las tasas de proceso, de consumo de combustible y/o de alimentación de materiales (Radian Corporation, 1996).

Los factores basados en procesos son un promedio de las mediciones realizadas a un gran número de fuentes. Estas fuentes pueden tener diferentes tecnologías de combustión, utilizar combustibles de diferente calidad, tener diferentes tamaños y antigüedad, por lo que son valores representativos para una amplia variedad de fuentes (CONAMA, 2009).

La ecuación general para la estimación de emisiones de contaminantes por este método se muestra a continuación:

$$E = FE * NA \left(1 - \frac{ER}{100} \right)$$

Donde:

E= Emisión del contaminante.

FE= Factor de emisión.

NA= Nivel de actividad.

ER=Eficiencia de reducción del equipo de control.

Para el cálculo de las emisiones de los diferentes contaminantes emitidos en el proceso de combustión de combustóleo y gas natural, se utilizará el método de factores de emisión. En el caso de la Central Termoeléctrica “Francisco Pérez Ríos” no se cuenta con un equipo de control, por lo que la ecuación para la estimación de emisiones queda de la siguiente manera:

$$E = FE * NA$$

4.1 Factores de emisión seleccionados

Los FE seleccionados son factores basados en procesos. La base de datos utilizada es la contenida en el documento AP- 42 “Compilation of Air Pollutant Emissions Factors”, publicado por la US-EPA.

Se utilizó el capítulo 1 “External Combustion Sources”, en específico las secciones 1.3 “Fuel Oil Combustion”, y 1.4 “Natural Gas Combustion”.

La US-EPA clasifica los factores de emisión, de la siguiente manera (Pouliot et al., 2012):

A= Excelente. El factor de emisión es desarrollado principalmente de pruebas en fuente clasificadas como A y B, tomadas de muchas instalaciones de manera aleatoria de la población industrial. La población de categoría de fuente está suficientemente especificada para minimizar la variabilidad.

B= Arriba del Promedio. El factor de emisión es desarrollado principalmente de pruebas A o B, los datos son de un número moderado de instalaciones. Aunque no es evidente una tendencia, no está claro si las instalaciones probadas representan una muestra aleatoria de la industria. Al igual que con las pruebas A, la población de categoría de fuente está suficientemente especificada para minimizar la variabilidad.

C= Promedio. El factor de emisión se desarrolla principalmente de pruebas A, B, y C de un número razonable de instalaciones. Aunque no es evidente ninguna

tendencia específica, no está claro si las instalaciones probadas representan una muestra aleatoria de la industria. Al igual que con las pruebas A, la población de categoría de fuente es suficientemente especificada para minimizar la variabilidad.

D= Debajo del promedio. El factor de emisión se desarrolla principalmente de pruebas A, B y C a partir de un pequeño número de instalaciones y puede haber razones para sospechar que estas instalaciones no representan una muestra aleatoria de la industria. También puede haber evidencia de variabilidad dentro de la población de categoría de fuente.

E= Pobre. El factor se desarrolla a partir de datos de pruebas C y D de un número muy limitado de instalaciones, y puede haber razones para sospechar que las instalaciones analizadas no representan una muestra aleatoria de la industria. También puede haber evidencia de variabilidad dentro de la población categoría de fuente.

Las pruebas mediante las cuales se determinan los FE se clasifican de la siguiente manera:

A= Pruebas que se realizan mediante una metodología sólida y son reportadas con suficiente detalle para su validación adecuada.

B= Pruebas que se realizan mediante una metodología generalmente sólida, pero carente de suficiente detalle para su validación adecuada.

C=Pruebas basadas en una metodología no probada o nueva, o carente de una cantidad significativa de información como antecedentes.

D= Pruebas basadas en un método generalmente inaceptable, pero el método puede proveer un valor de orden de magnitud para la fuente.

En las tablas 4.1 a 4.5 se presentan los factores de emisión para los diferentes contaminantes a evaluar para ambos combustibles, obtenidos de las secciones 1.3 y 1.4 del AP-42 "External Combustion Sources" (US-EPA, 1998):

Tabla 4. 1 Factores de emisión de contaminantes criterio por la combustión de combustóleo y gas natural.

Tipo de configuración de quemadores	Contaminante	Fórmula	Combustóleo		Gas Natural	
			Factor de emisión (lb/10 ³ gal)	Clasificación del factor de emisión	Factor de emisión (lb/10 ⁶ ft ³)	Clasificación del factor de emisión
Todos los tipos	Dióxido de azufre	SO ₂	157S ⁽¹⁾	A	0.6	A
Configuración Normal	Óxidos de Nitrógeno	NO _x ⁽²⁾	47	A	190	A
Configuración Tangencial			32	A	170	A
Configuración Normal	Monóxido de carbono	CO ⁽³⁾	5	A	84	B
Configuración Tangencial			5	A	24	C
Todos los tipos	Plomo	Pb	1.51E-03	C	5.00E-04	D
Todos los tipos	Partículas Totales	PM	8.3A ⁽⁴⁾	C	7.6	D

Notas:

- (1) (S) es el contenido de azufre en el combustible en porcentaje, que debe ser multiplicado por el valor dado.
- (2) Se ha observado que cerca del 95% de los NO_x son emitidos en forma de NO.
- (3) Las emisiones de CO pueden incrementar en factores de 10 a 100, si las unidades son operadas incorrectamente o no tienen buen mantenimiento.
- (4) El factor de emisión de partículas sin equipo de control son una función del grado del combustible y el contenido de azufre del mismo. Para aceite combustible grado No. 6 el valor de A se obtiene con la siguiente ecuación. $A = 1.12(S) + 0.37$.

Tabla 4. 2 Factores de emisión para gases de efecto invernadero por la combustión de combustóleo y gas natural.

Contaminante	Fórmula	Combustóleo		Gas Natural	
		Factor de emisión (lb/10 ³ gal)	Clasificación del factor de emisión	Factor de emisión (lb/10 ⁶ ft ³)	Clasificación del factor de emisión
Óxido nitroso	N ₂ O	0.53	E	2.2	E
Dióxido de carbono	CO ₂	24,400	B	120,000	A
Metano	CH ₄	0.28	A	2.3	B

Tabla 4. 3 Factores de emisión de contaminantes orgánicos por la combustión de combustóleo y gas natural.

Contaminante	Fórmula	Combustóleo		Gas Natural	
		Factor de emisión (lb/10 ³ gal)	Clasificación del factor de emisión	Factor de emisión (lb/10 ⁶ ft ³)	Clasificación del factor de emisión
Compuestos orgánicos totales	COT	1.04	A	11	B
Benceno	C ₆ H ₆	2.14E-04	C	2.10E-03	B
Formaldehído	CH ₂ O	3.30E-02	C	7.50E-02	B
Tolueno	C ₇ H ₈	6.20E-03	D	3.40E-03	C

Tabla 4. 4 Factores de emisión para hidrocarburos aromáticos policíclicos por la combustión de combustóleo y gas natural.

Contaminante	Fórmula	Combustóleo		Gas Natural	
		Factor de emisión (lb/10 ³ gal)	Clasificación del factor de emisión	Factor de emisión (lb/10 ⁶ ft ³)	Clasificación del factor de emisión
Acenafteno	C ₁₂ H ₁₀	2.11E-05	C	<1.8E-06	E
Acenaftileno	C ₁₂ H ₈	2.53E-07	D	<1.8E-06	E
Antraceno	C ₁₄ H ₁₀	1.22E-06	C	<2.4E-06	E
Benzo(a) antraceno	C ₁₈ H ₁₂	4.01E-06	C	<1.8E-06	E
Benzo(b,k)fluoranteno	C ₂₀ H ₁₂	1.48E-06	C	<1.8E-06	E
Benzo(g,h,i)perileno	C ₂₂ H ₁₂	2.26E-06	C	<1.2E-06	E
Criseno	C ₁₈ H ₁₂	2.38E-06	C	<1.8E-06	E
Dibenzo(a,h)antraceno	C ₂₂ H ₁₄	1.67E-06	D	<1.2E-06	E
Fenantreno	C ₁₄ H ₁₀	1.05E-05	C	1.70E-05	D
Fluoranteno	C ₁₆ H ₁₀	4.84E-06	C	3.00E-06	E
Fluoreno	C ₁₃ H ₁₀	4.47E-06	C	2.80E-06	E
Indeno(1,2,3-cd)pireno	C ₂₂ H ₁₂	2.14E-06	C	<1.8E-06	E
Naftaleno	C ₁₀ H ₈	1.13E-03	C	6.10E-04	E
Pireno	C ₁₆ H ₁₀	4.25E-06	C	5.00E-06	E

Tabla 4. 5 Factores de emisión de contaminantes tóxicos inorgánicos por la combustión de combustóleo y gas natural.

Contaminante	Fórmula	Combustóleo		Gas Natural	
		Factor de emisión (lb/10 ³ gal)	Clasificación del factor de emisión	Factor de emisión (lb/10 ⁶ ft ³)	Clasificación del factor de emisión
Arsénico	As	1.32E-03	C	2.00E-04	E
Bario	Ba	2.57E-03	D	4.40E-03	D
Berilio	Be	2.78E-05	C	<1.2E-05	E

Contaminante	Fórmula	Combustóleo		Gas Natural	
		Factor de emisión (lb/10 ³ gal)	Clasificación del factor de emisión	Factor de emisión (lb/10 ⁶ ft ³)	Clasificación del factor de emisión
Cadmio	Cd	3.98E-04	C	1.10E-03	D
Cromo	Cr	8.45E-04	C	1.40E-03	D
Cobalto	Co	6.02E-03	D	8.40E-05	D
Cobre	Cu	1.76E-03	C	8.50E-04	C
Manganeso	Mn	3.00E-03	C	3.80E-04	D
Mercurio	Hg	1.13E-04	C	2.60E-04	D
Molibdeno	Mo	7.87E-04	D	1.10E-03	D
Níquel	Ni	8.45E-02	C	2.10E-03	C
Selenio	Se	6.83E-04	C	<2.4E-05	E
Vanadio	V	3.18E-02	D	2.30E-03	D
Zinc	Zn	2.91E-02	D	2.90E-02	E

Los valores de FE en las tablas anteriores, fueron empleados conjuntamente con el consumo diario de combustible por unidad de generación para la estimación de emisiones.

4.2 Estimación de emisiones para combustóleo.

Los datos disponibles para la estimación de emisiones son los consumos de combustóleo diarios para cada una de las cinco unidades de generación. El periodo de estudio fue de enero a diciembre del 2010. El total de datos con los que se contó es de 1335, descartando los datos de los días en los que se realizó mantenimiento a las unidades o estuvieron fuera de servicio. Es recomendable contar con datos de presión y temperatura para realizar la corrección a condiciones del sitio.

El cálculo se realizó para cada uno de los contaminantes, el ejemplo de cálculo presente en el cuerpo del documento, se realizó con los datos del día 22 de enero del 2010, para la unidad de generación 1, siendo este día elegido por tener el mayor consumo, durante el periodo previamente señalado.

Los datos generales para el caso ejemplo, se presentan en la tabla 4.6:

Tabla 4. 6 Especificaciones generales para la Unidad de generación 1, del día 22 de enero de 2010.

Configuración de los quemadores	Tangencial
Contenido de azufre en el combustible (S)	3.9%
Nivel de actividad (NA)	1801 m ³ /día
Factor para convertir de $\frac{lb}{10^3 gal}$ a $\frac{kg}{10^3 L}$	0.12
Factor para convertir de $\frac{lb}{10^6 ft^3}$ a $\frac{kg}{10^6 m^3}$	16

A continuación se presenta el ejemplo de cálculo para los contaminantes criterio, el resto de los contaminantes se calculan de la misma manera, considerando los FE de las tablas 4.1 a 4.5:

- Dióxido de Azufre

$$FE = 157S \quad (lb/10^3 gal) \qquad FE = 157S = 157(3.9) = 612.3 \frac{lb}{10^3 gal}$$

$$FE = 612.3 \frac{lb}{10^3 gal} * 0.12 = 73.476 \frac{kg}{10^3 L}$$

$$E_{SO_2} = 1801 \frac{m^3}{día} \left(73.476 \frac{kg}{10^3 L} \right) \left(\frac{1000 L}{1 m^3} \right) = 132330.27 \frac{kg}{día}$$

- Óxidos de Nitrógeno

$$FE = 32 lb/10^3 gal \qquad FE = 32 \frac{lb}{10^3 gal} * 0.12 = 3.84 \frac{kg}{10^3 L}$$

$$E_{NO_x} = 1801 \frac{m^3}{día} \left(3.84 \frac{kg}{10^3 L} \right) \left(\frac{1000 L}{1 m^3} \right) = 6915.84 \frac{kg}{día}$$

- Monóxido de Carbono

$$FE = 5 lb/10^3 gal \qquad FE = 5 \frac{lb}{10^3 gal} * 0.12 = 0.6 \frac{kg}{10^3 L}$$

$$E_{CO} = 1801 \frac{m^3}{día} \left(0.6 \frac{kg}{10^3 L} \right) \left(\frac{1000 L}{1 m^3} \right) = 1080.6 \frac{kg}{día}$$

- Plomo

$$FE = 1.51 \times 10^{-3} lb/10^3 gal \qquad FE = 1.51 \times 10^{-3} \frac{lb}{10^3 gal} * 0.12 = 0.0001812 \frac{kg}{10^3 L}$$

$$E_{Pb} = 1801 \frac{m^3}{día} \left(0.0001812 \frac{kg}{10^3 L} \right) \left(\frac{1000 L}{1 m^3} \right) = 0.32634 \frac{kg}{día}$$

- Partículas Totales

$$FE = 8.3 A (lb/10^3 gal) \qquad A = 1.12(S) + 0.37$$

$$FE = 8.3((1.12 * 3.9) + 0.37) = 39.3254 \frac{lb}{10^3 gal}$$

$$FE = 39.3254 \frac{lb}{10^3 gal} * 0.12 = 4.719048 \frac{kg}{10^3 L}$$

$$E_{PT} = 1801 \frac{m^3}{día} \left(4.719048 \frac{kg}{10^3 L} \right) \left(\frac{1000 L}{1 m^3} \right) = 8499.01 \frac{kg}{día}$$

4.3 Balance energético para calcular el consumo de gas natural

Para conocer el consumo de gas natural es necesario realizar un balance energético, esto se logra considerando que la cantidad de energía producida debe ser la misma con ambos combustibles. El balance se realiza utilizando el consumo de combustóleo diario en el periodo de estudio, el poder calorífico de ambos combustibles y la eficiencia de conversión del combustible.

La ecuación a utilizar es la siguiente:

$$C_1 PC_1 \eta_1 = C_2 PC_2 \eta_2$$

Donde:

$$C_1 = \text{Consumo diario de combustóleo} = \frac{m^3}{\text{día}}$$

$$PC_1 = \text{Poder calorífico de combustóleo} = \frac{kcal}{m^3}$$

$$\eta_1 = \text{Eficiencia de conversión de combustóleo} = \%$$

$$C_2 = \text{Consumo diario de gas natural} = \frac{m^3}{\text{día}}$$

$$PC_2 = \text{Poder calorífico de gas natural} = \frac{kcal}{m^3}$$

$$\eta_2 = \text{Eficiencia de conversión de gas natural} = \%$$

Para conocer el consumo diario de gas natural despejamos:

$$C_2 = \frac{C_1 PC_1 \eta_1}{PC_2 \eta_2}$$

La eficiencia de conversión de los combustibles es de 34.9% para combustóleo y 40.7% para gas natural (SENER, 2011).

Los valores de poder calorífico utilizados se muestran en la tabla 4.7:

Tabla 4. 7 Valores de poder calorífico de combustibles.

Combustible	Poder Calorífico $\frac{kcal}{m^3}$	Poder Calorífico $\frac{Btu}{gal}$
Aceite No.6	9.98×10^6	150,000
Gas Natural	9,341	1,050

Fuente: (US-EPA, 1985).

Como ejemplo se presenta el cálculo del consumo estimado de gas natural para el caso ejemplo, con un consumo de combustóleo de $1801 \text{ m}^3/\text{día}$:

$$C_1 = 1801 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \quad \eta_1 = 34.9\%$$

$$\eta_2 = 40.7\%$$

$$PC_1 = 9.98 \times 10^6 \frac{kcal}{\text{m}^3}$$

$$PC_2 = 9,341 \frac{kcal}{\text{m}^3}$$

$$C_2 = \frac{\left(1801 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}\right) \left(9.98 \times 10^6 \frac{kcal}{\text{m}^3}\right) (34.9\%)}{9,341 \frac{kcal}{\text{m}^3} (40.7\%)} = 1,649,992.23 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \text{ de Gas Natural}$$

4.4 Estimación de emisiones para Gas Natural

Considerando el valor de consumo diario de gas natural calculado como se mostró en la sección anterior y los FE para los diferentes contaminantes aplicados a este combustible, se presenta a continuación el ejemplo de cálculo de emisión para los contaminantes criterio. El resto de los cálculos se realizó de la misma manera, simplemente sustituyendo el valor del factor de emisión correspondiente a cada contaminante por la combustión de gas natural.

- Dióxido de Azufre

$$FE = 0.6 \text{ (lb/10}^6 \text{ ft}^3)$$

$$FE = 0.6 \frac{\text{lb}}{10^6 \text{ ft}^3} * 16 = 9.6 \frac{\text{kg}}{10^6 \text{ m}^3}$$

$$E_{SO_2} = 1,649,992.23 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \left(9.6 \frac{\text{kg}}{10^6 \text{ m}^3} \right) = 15.83 \frac{\text{kg}}{\text{día}}$$

- Óxidos de Nitrógeno

$$FE = 170 \text{ (lb/10}^6 \text{ ft}^3) \quad FE = 170 \frac{\text{lb}}{10^6 \text{ ft}^3} * 16 = 2720 \frac{\text{kg}}{10^6 \text{ m}^3}$$

$$E_{NO_x} = 1,649,992.23 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \left(2720 \frac{\text{kg}}{10^6 \text{ m}^3} \right) = 4487.97 \frac{\text{kg}}{\text{día}}$$

- Monóxido de Carbono

$$FE = 24 \text{ (lb/10}^6 \text{ ft}^3) \quad FE = 24 \frac{\text{lb}}{10^6 \text{ ft}^3} * 16 = 384 \frac{\text{kg}}{10^6 \text{ m}^3}$$

$$E_{CO} = 1,649,992.23 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \left(384 \frac{\text{kg}}{10^6 \text{ m}^3} \right) = 633.59 \frac{\text{kg}}{\text{día}}$$

- Plomo

$$FE = 0.0005 \text{ (lb/10}^6 \text{ ft}^3) \quad FE = 0.0005 \frac{\text{lb}}{10^6 \text{ ft}^3} * 16 = 0.008 \frac{\text{kg}}{10^6 \text{ m}^3}$$

$$E_{Pb} = 1,649,992.23 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \left(0.008 \frac{\text{kg}}{10^6 \text{ m}^3} \right) = 0.01319 \frac{\text{kg}}{\text{día}}$$

- Partículas Totales

$$FE = 7.6 \text{ (lb/10}^6 \text{ ft}^3) \quad FE = 7.6 \frac{\text{lb}}{10^6 \text{ ft}^3} * 16 = 121.6 \frac{\text{kg}}{10^6 \text{ m}^3}$$

$$E_{PT} = 1,649,992.23 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \left(121.6 \frac{\text{kg}}{10^6 \text{ m}^3} \right) = 200.64 \frac{\text{kg}}{\text{día}}$$

CAPÍTULO 5. RESULTADOS

5.1 Resultados comparativos de emisiones por tipo de contaminante.

La CTFPR opera los 365 días del año, sin embargo no todas las unidades lo hacen al mismo tiempo, la cantidad de unidades que funcionan en determinado momento depende de la demanda de electricidad y del mantenimiento aplicado a cada unidad.

Los días de operación por unidad durante el periodo de estudio se presentan en la tabla 5.1:

Tabla 5. 1 Días de operación de cada unidad de generación.

Unidad de generación	Días de operación
U1	287
U2	290
U3	273
U4	262
U5	223

A partir de las emisiones estimadas para los diferentes contaminantes atmosféricos estudiados (5 criterio, 18 tóxicos orgánicos, 14 tóxicos inorgánicos y 3 gases de efecto de invernadero), se elaboraron gráficas comparativas donde se muestran las emisiones totales (suma de las 5 unidades de generación), tanto por consumo de combustóleo como para gas natural (figura 5.1 a la 5.40).

Debido a la gran diferencia en los órdenes de magnitud de las emisiones para varios contaminantes atmosféricos, entre el consumo de combustóleo y de gas natural, se utilizó escala logarítmica en las figuras mencionadas.

La línea de color azul corresponde al combustóleo y la verde al gas natural.

— Combustóleo
— Gas Natural

CONTAMINANTES CRITERIO

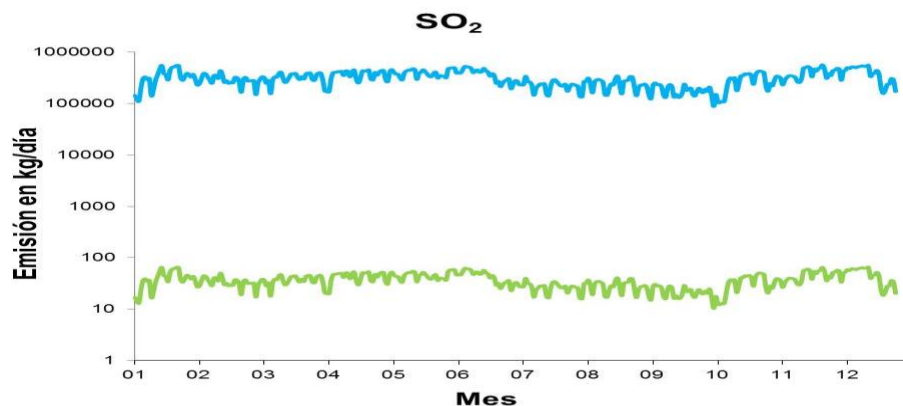


Figura 5. 1 Emisión de SO₂ con ambos combustibles.

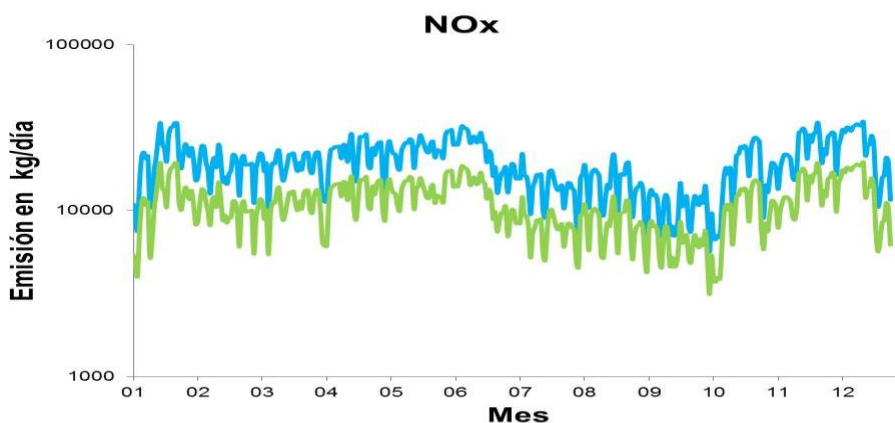


Figura 5. 2 Emisión de NO_x con ambos combustibles.

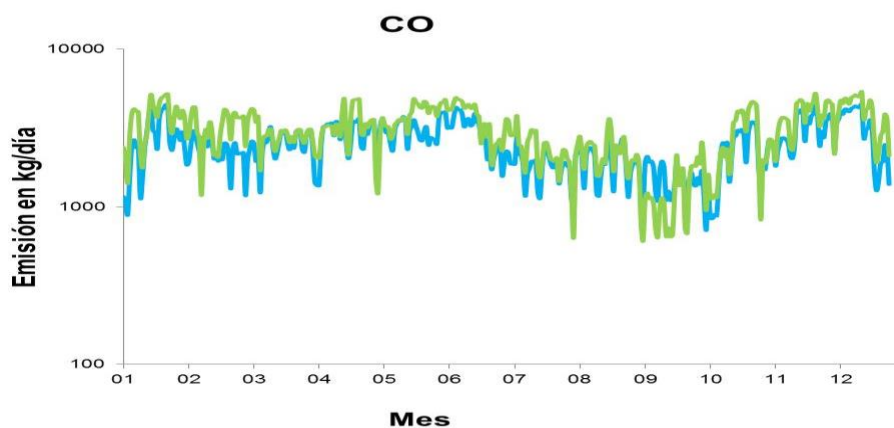


Figura 5. 3 Emisión de CO con ambos combustibles.

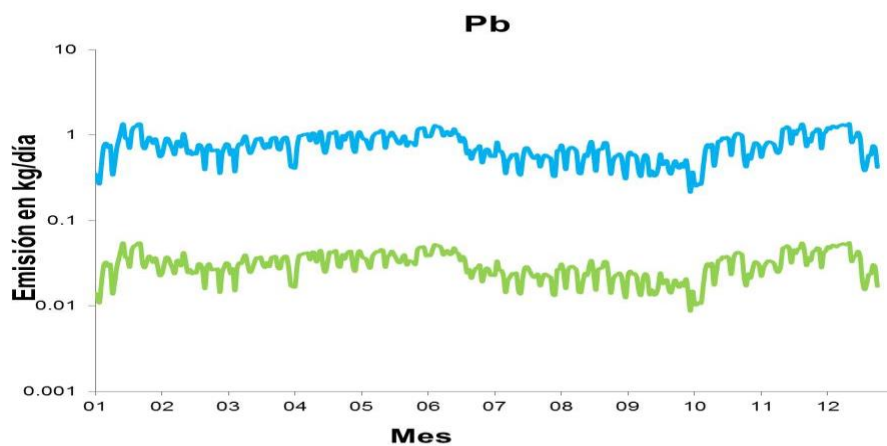


Figura 5. 4 Emisión de Pb con ambos combustibles.

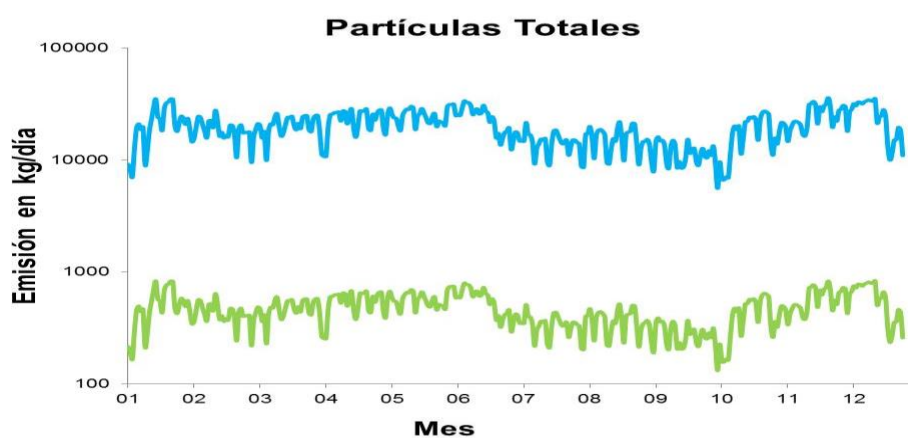


Figura 5. 5 Emisión de partículas totales con ambos combustibles.

GASES DE EFECTO INVERNADERO

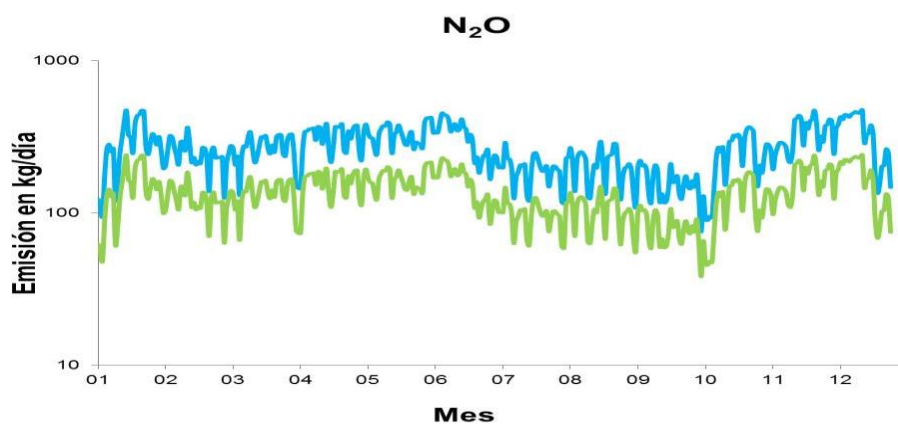


Figura 5. 6 Emisión de N₂O con ambos combustibles.

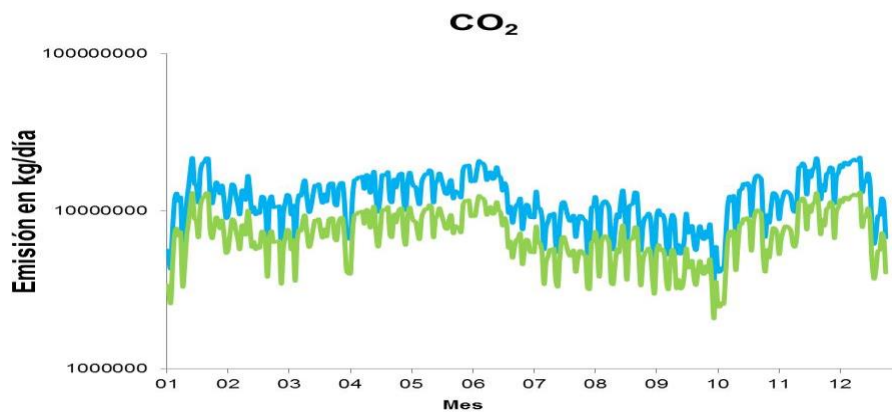


Figura 5. 7 Emisión de CO₂ con ambos combustibles.

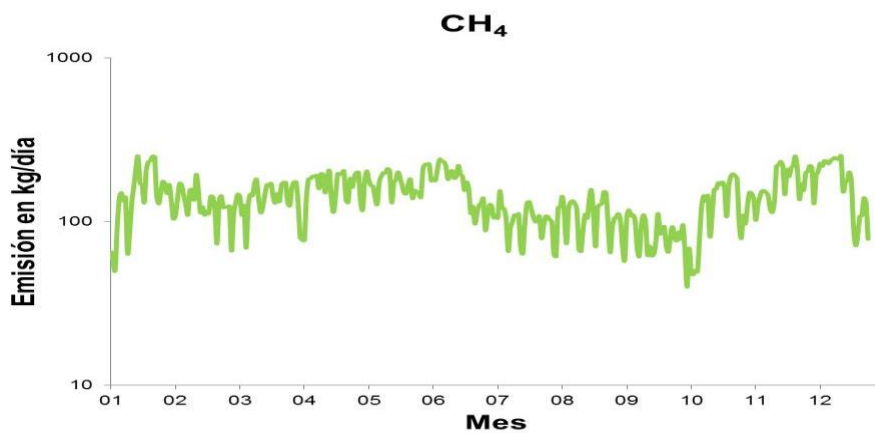


Figura 5. 8 Emisión de CH₄ con ambos combustibles.

CONTAMINANTES TÓXICOS ORGÁNICOS

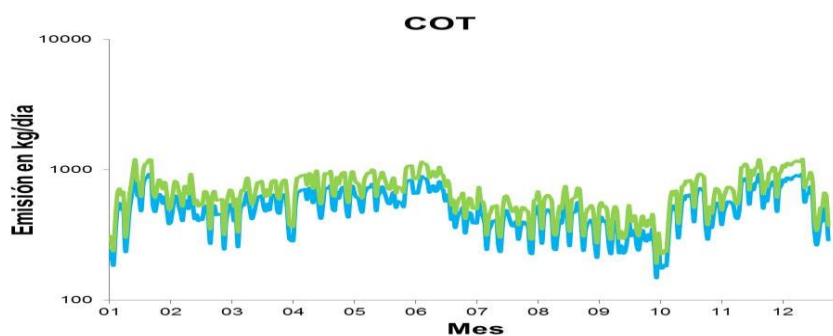


Figura 5. 9 Emisión de COT con ambos combustibles.

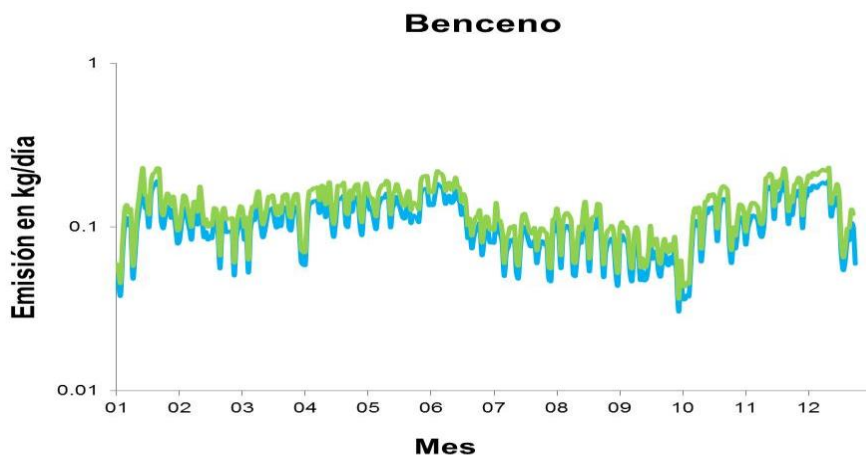


Figura 5. 10 Emisión de benceno con ambos combustibles.

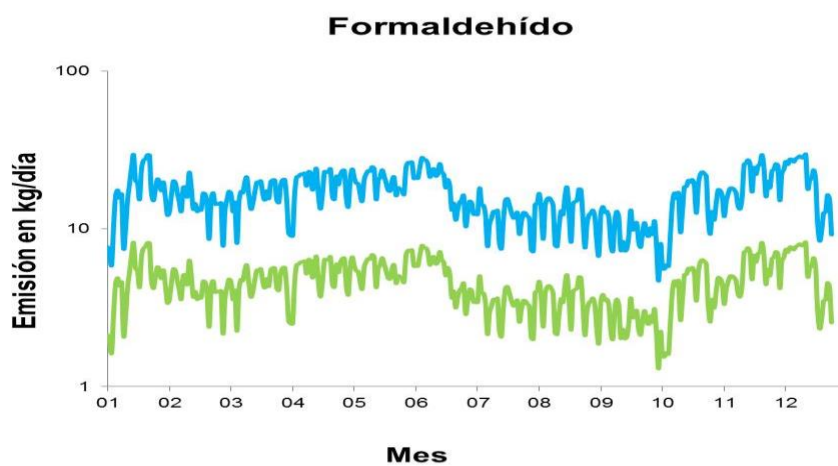


Figura 5. 11 Emisión de formaldehído con ambos combustibles.

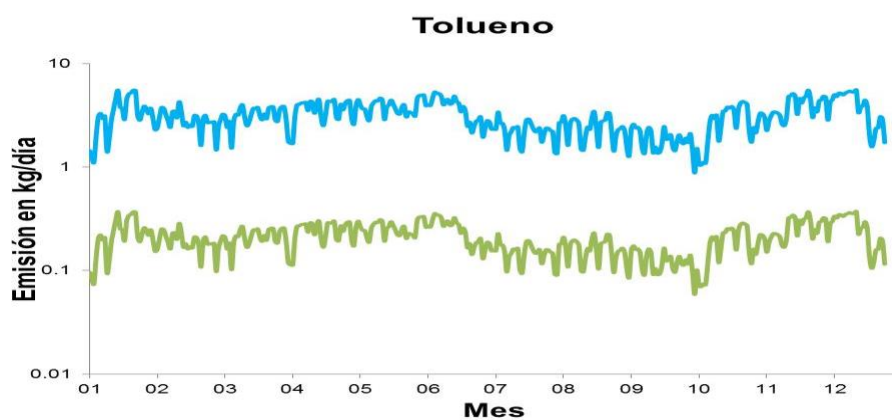


Figura 5. 12 Emisión de tolueno con ambos combustibles.

HIDROCARBUROS AROMATICOS POLICICLICOS

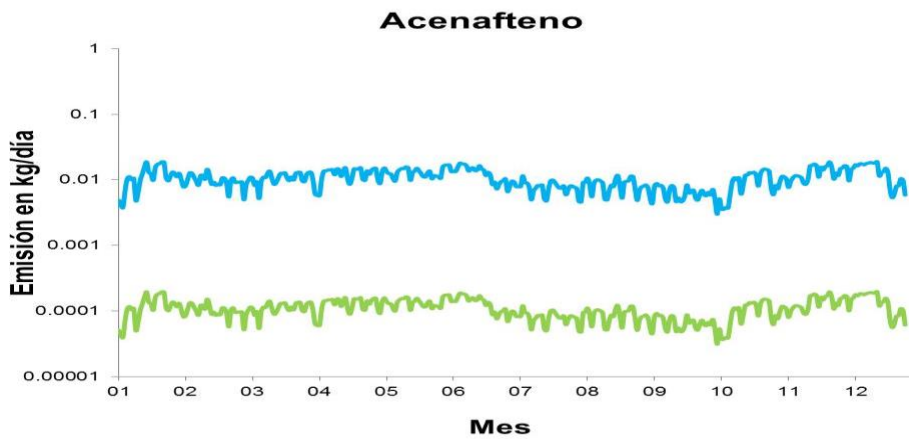


Figura 5. 13 Emisión de acenafteno con ambos combustibles.

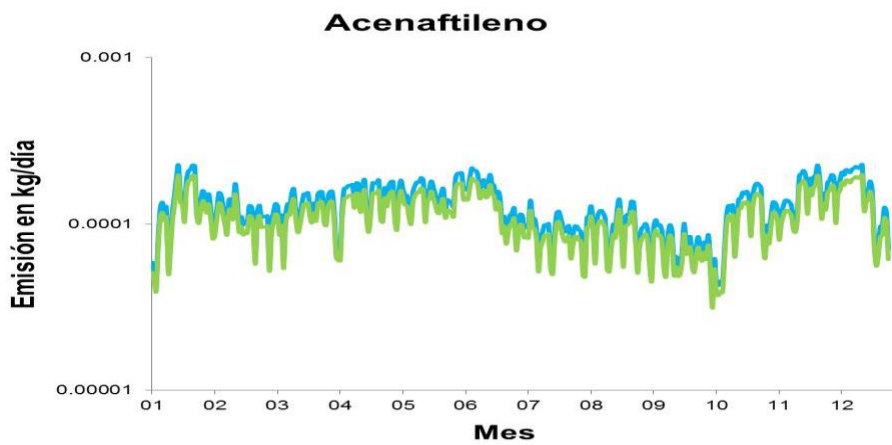


Figura 5. 14 Emisión de acenaftileno con ambos combustibles.

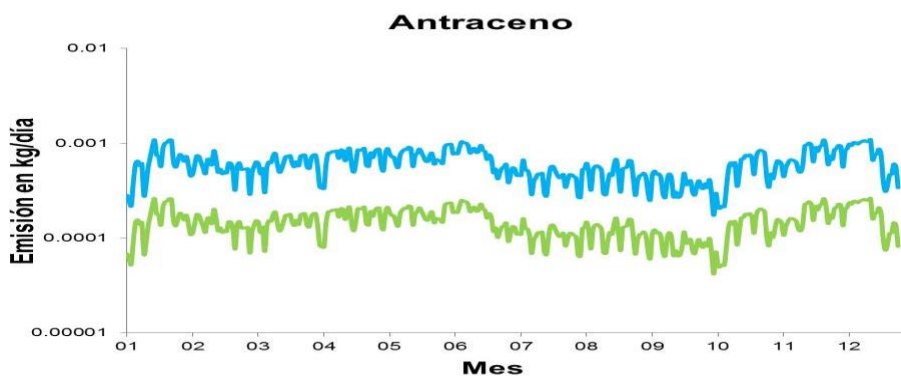


Figura 5. 15 Emisión de antraceno con ambos combustibles.

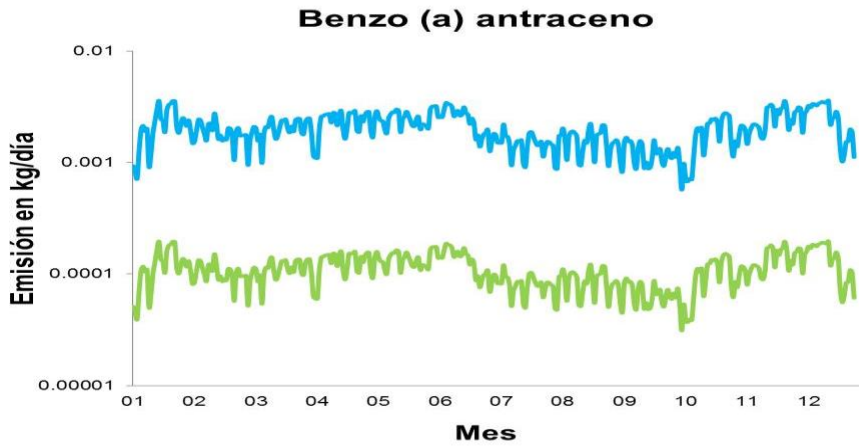


Figura 5. 16 Emisión de benzo (a) antraceno con ambos combustibles.

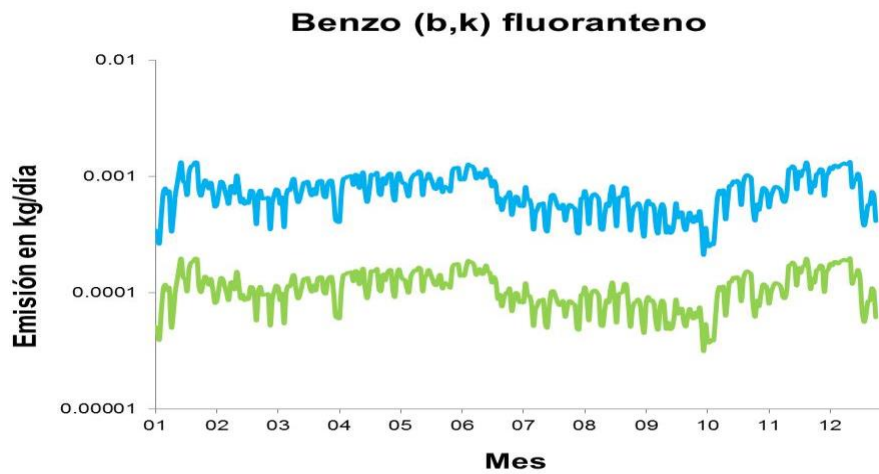


Figura 5. 17 Emisión de benzo (b,k) fluoranteno con ambos combustibles.

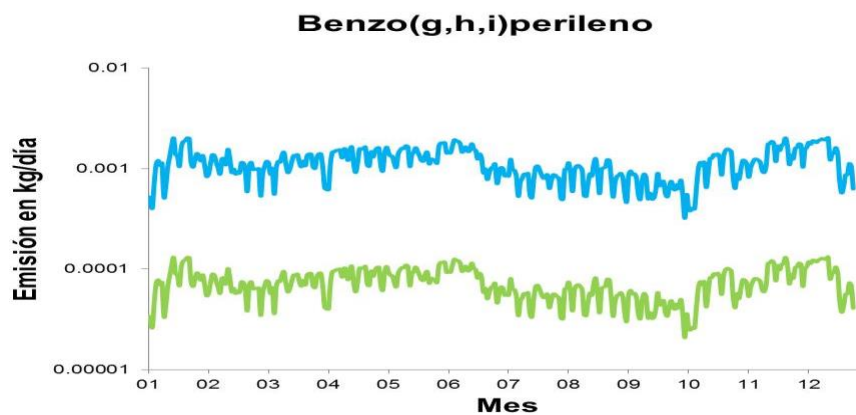


Figura 5. 18 Emisión de benzo (g,h,i) perileno con ambos combustibles.

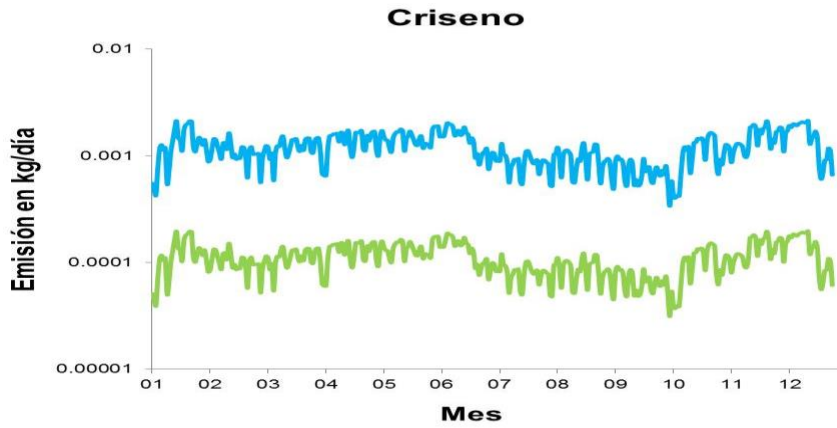


Figura 5. 19 Emisión de criseno con ambos combustibles.

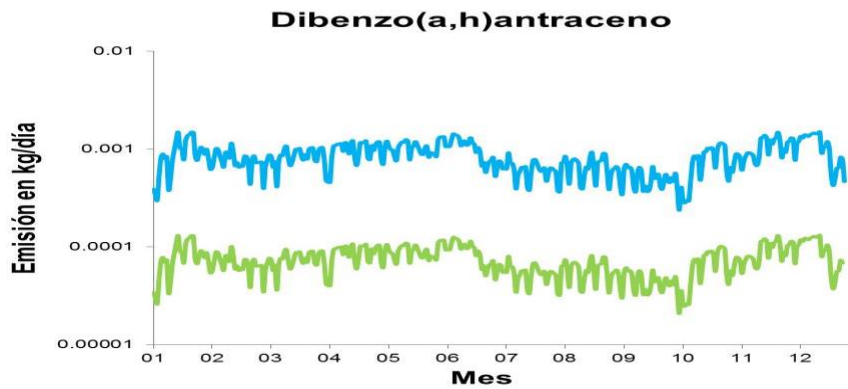


Figura 5. 20 Emisión de dibenzo(a, h) antraceno con ambos combustibles.

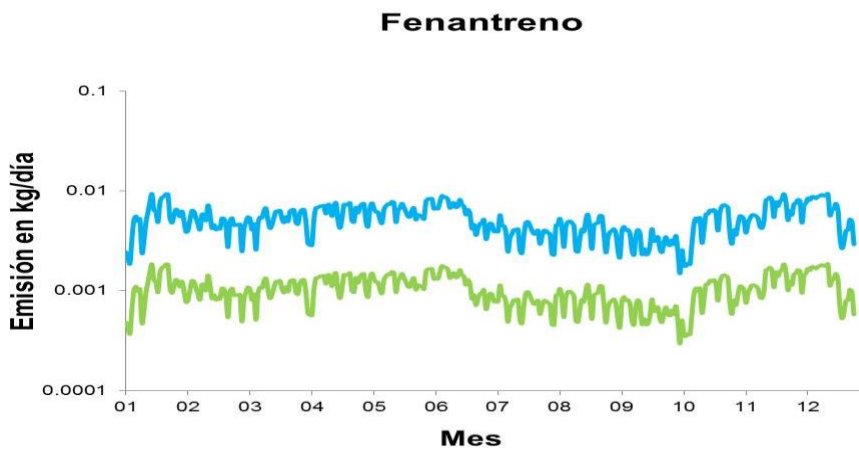


Figura 5. 21 Emisión de fenantreno con ambos combustibles.

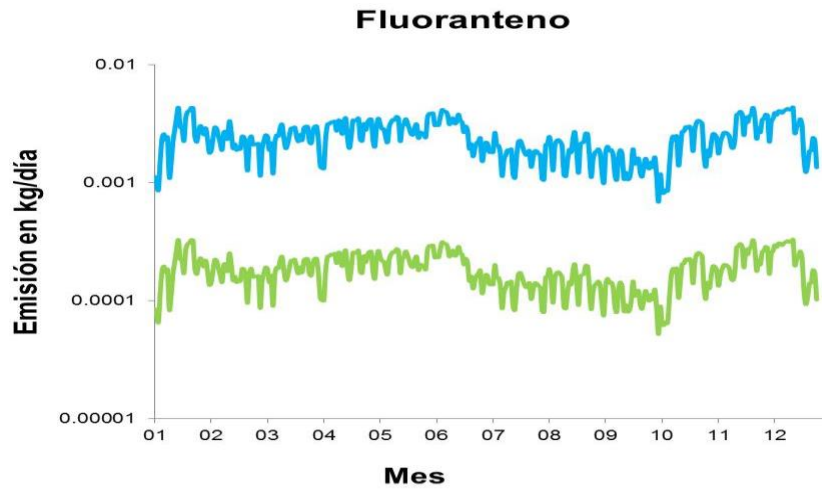


Figura 5. 22 Emisión de fluoranteno con ambos combustibles.

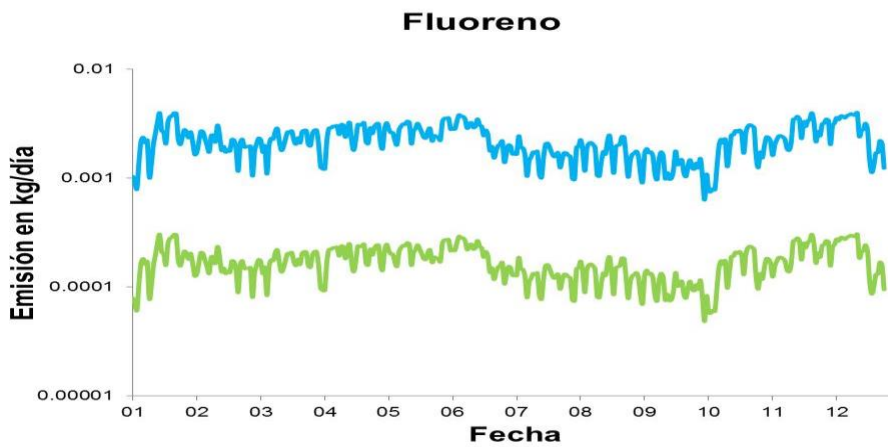


Figura 5. 23 Emisión de fluoreno con ambos combustibles.

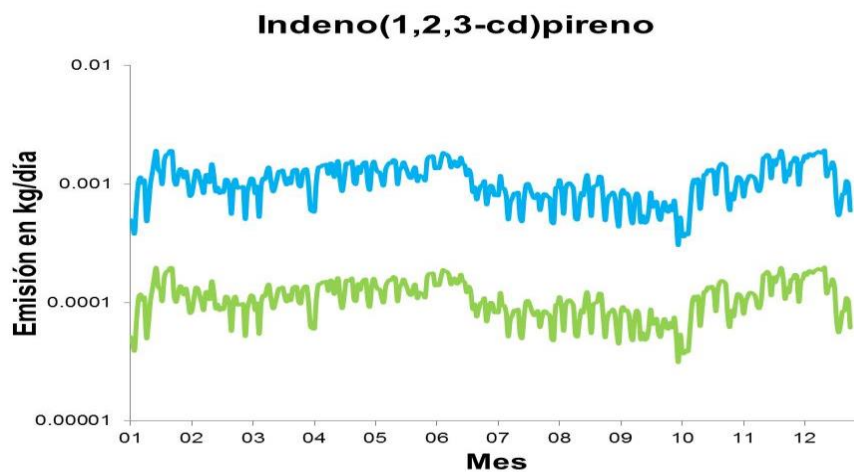


Figura 5. 24 Emisión de Indeno (1, 2,3-cd) pireno con ambos combustibles.

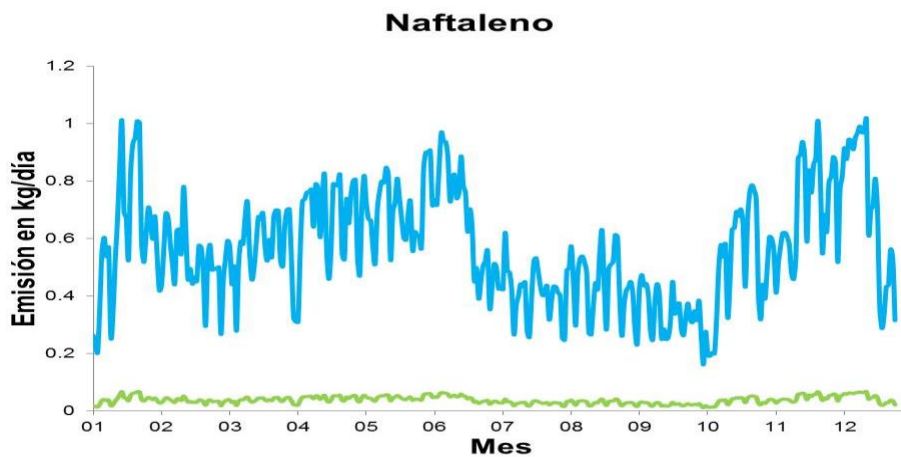


Figura 5. 25 Emisión de naftaleno con ambos combustibles.

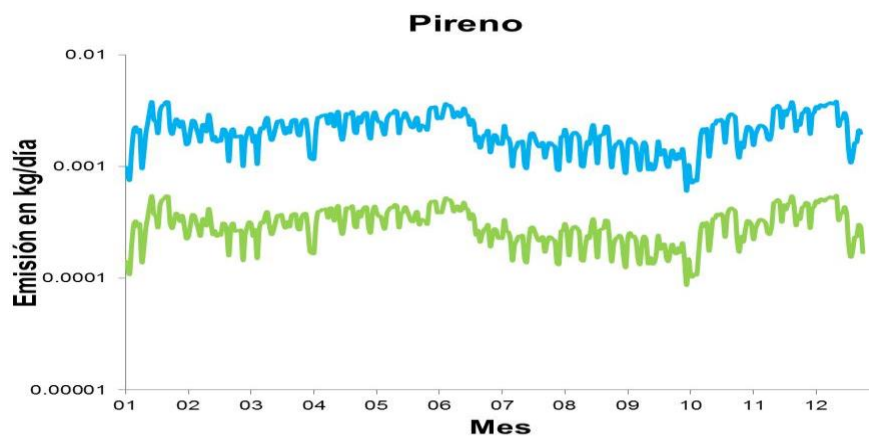


Figura 5. 26 Emisión de pireno con ambos combustibles.

CONTAMINANTES TÓXICOS INORGÁNICOS

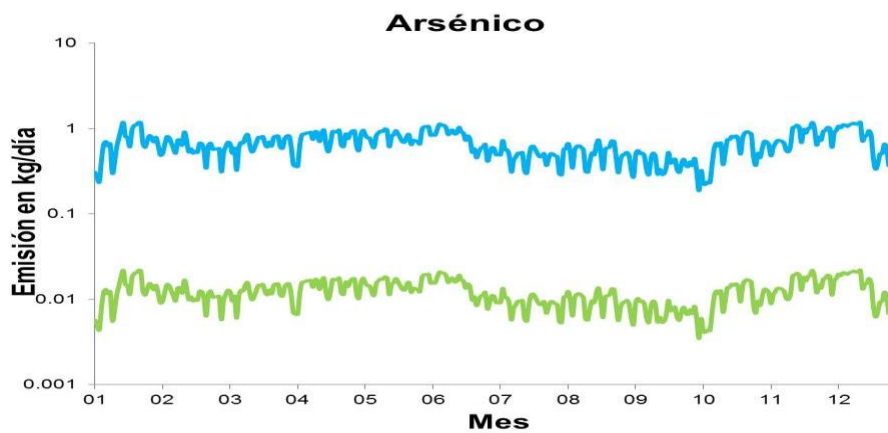


Figura 5. 27 Emisión de arsénico con ambos combustibles.

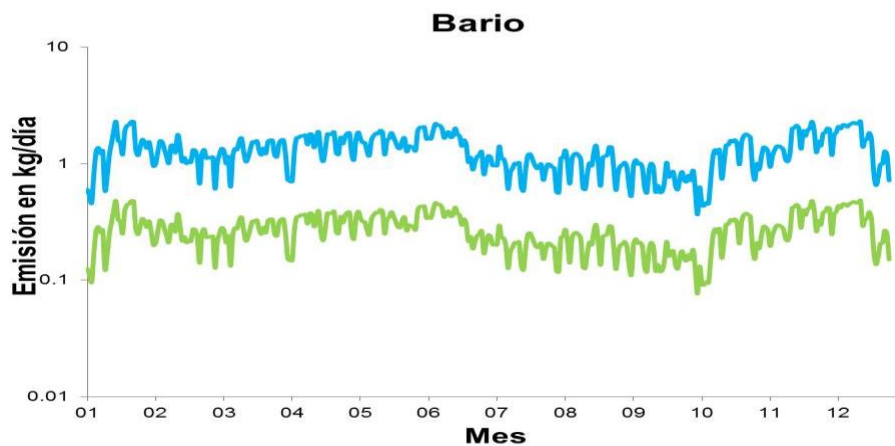


Figura 5. 28 Emisión de bario con ambos combustibles.

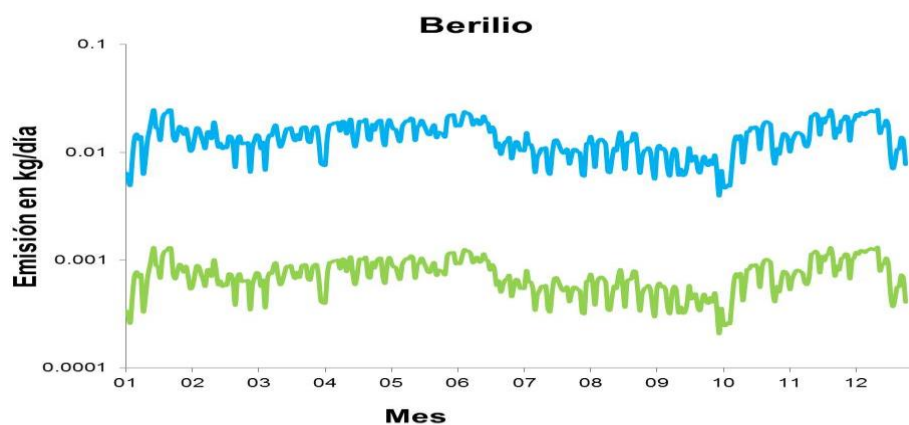


Figura 5. 29 Emisión de berilio con ambos combustibles.

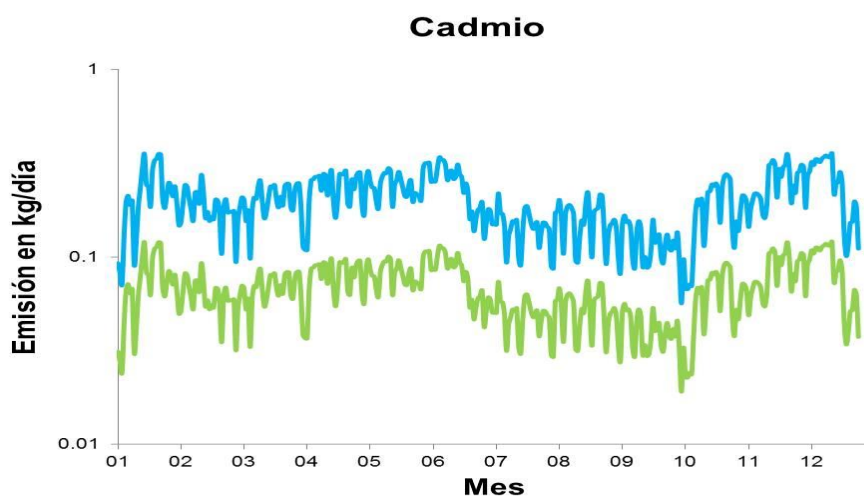


Figura 5. 30 Emisión de cadmio con ambos combustibles.

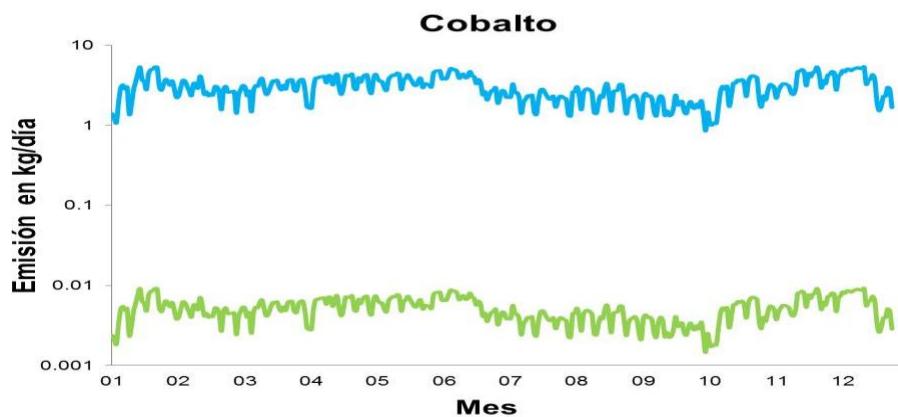


Figura 5. 31 Emisión de cobalto con ambos combustibles.

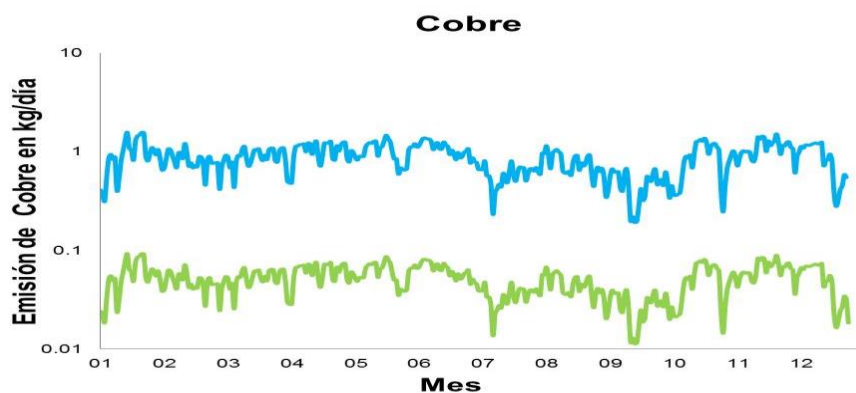


Figura 5. 32 Emisión de cobre con ambos combustibles.

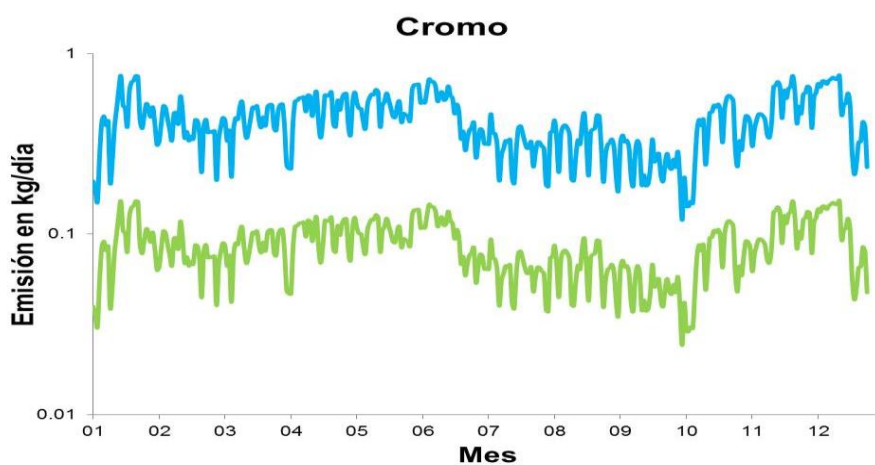


Figura 5. 33 Emisión de cromo con ambos combustibles.

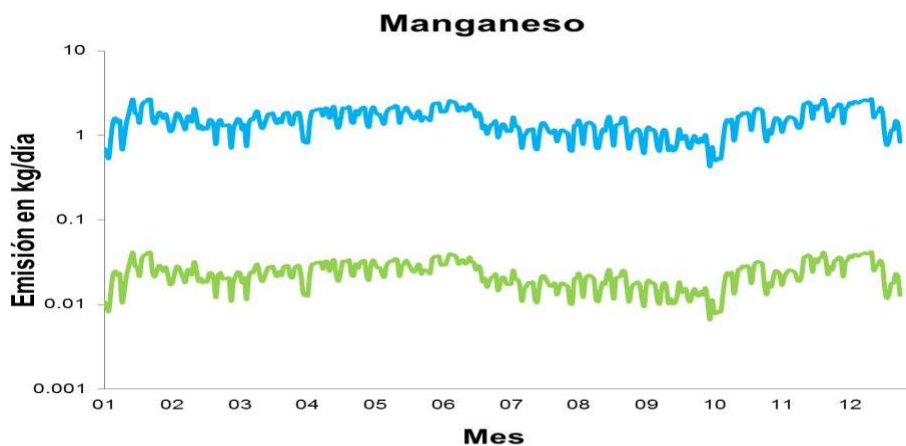


Figura 5. 34 Emisión de manganeso con ambos combustibles.

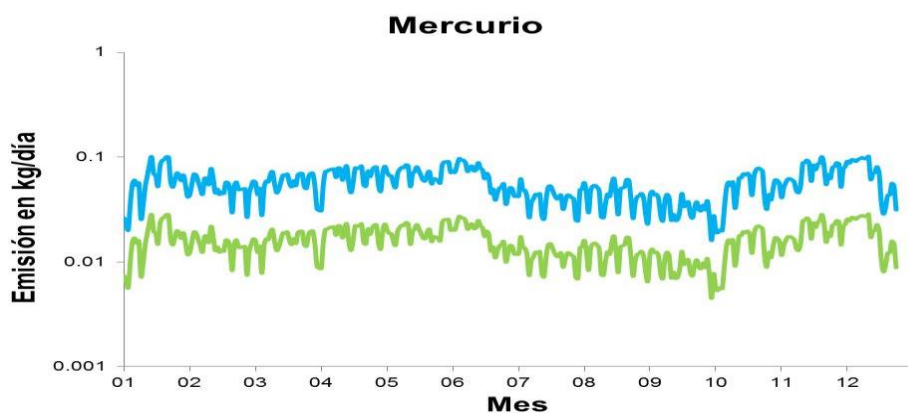


Figura 5. 35 Emisión de mercurio con ambos combustibles.

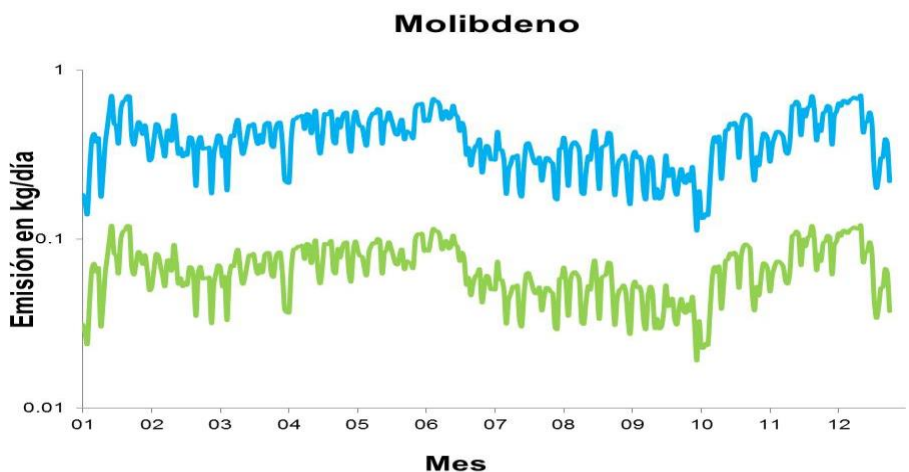


Figura 5. 36 Emisión de molibdeno con ambos combustibles.

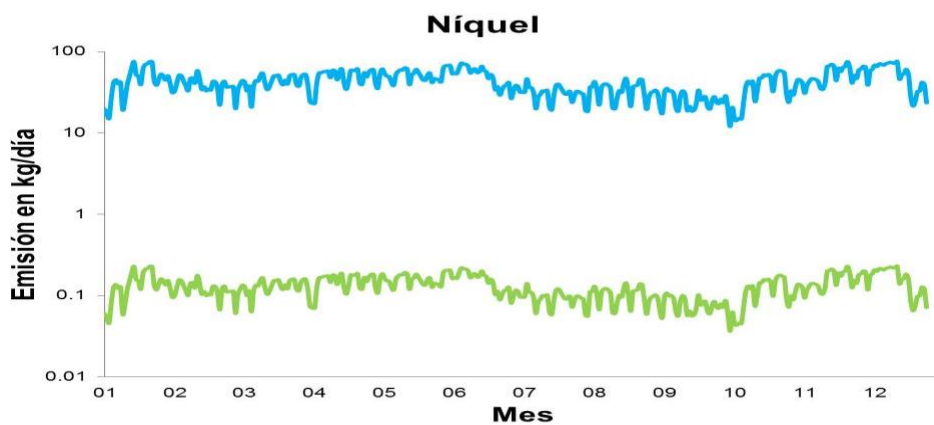


Figura 5. 37 Emisión de níquel con ambos combustibles.

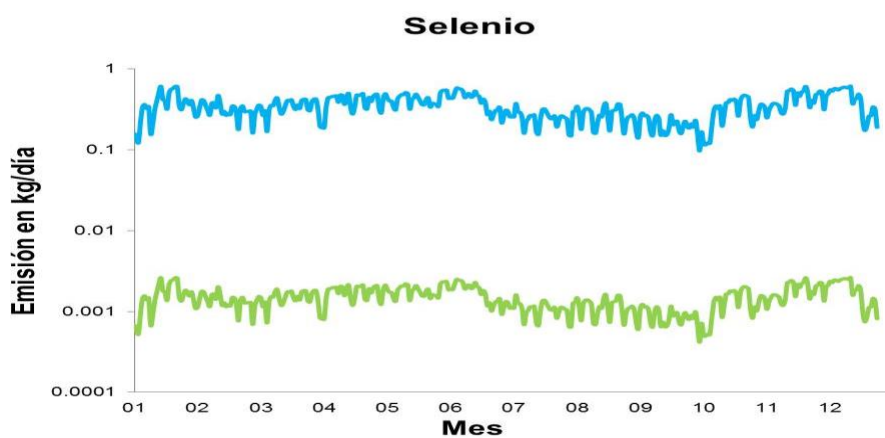


Figura 5. 38 Emisión de selenio con ambos combustibles.

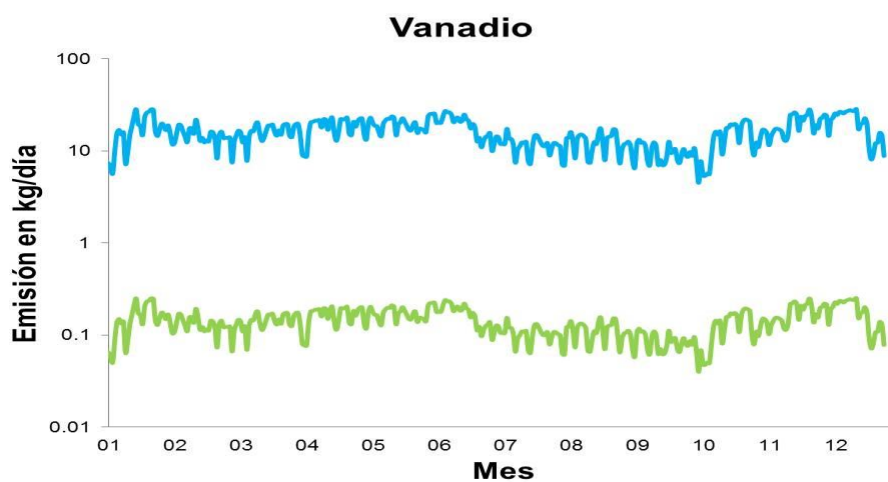


Figura 5. 39 Emisión de vanadio con ambos combustibles.

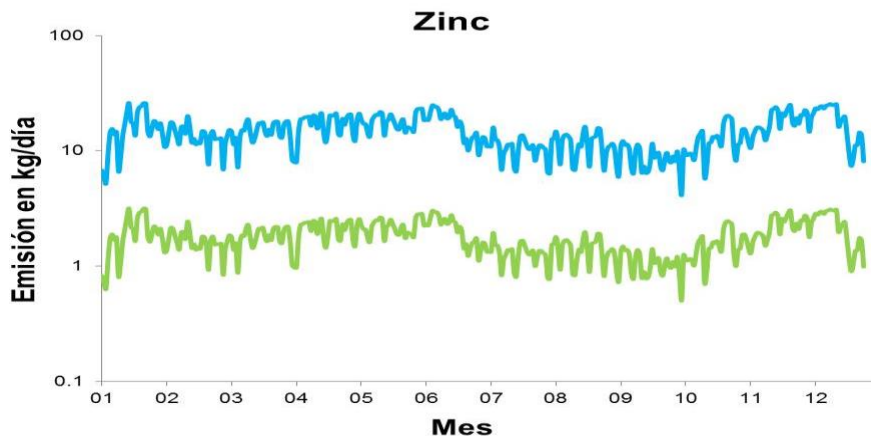


Figura 5. 40 Emisión de zinc con ambos combustibles.

En la figura 5.41 se muestra el resumen de las emisiones totales con ambos combustibles.

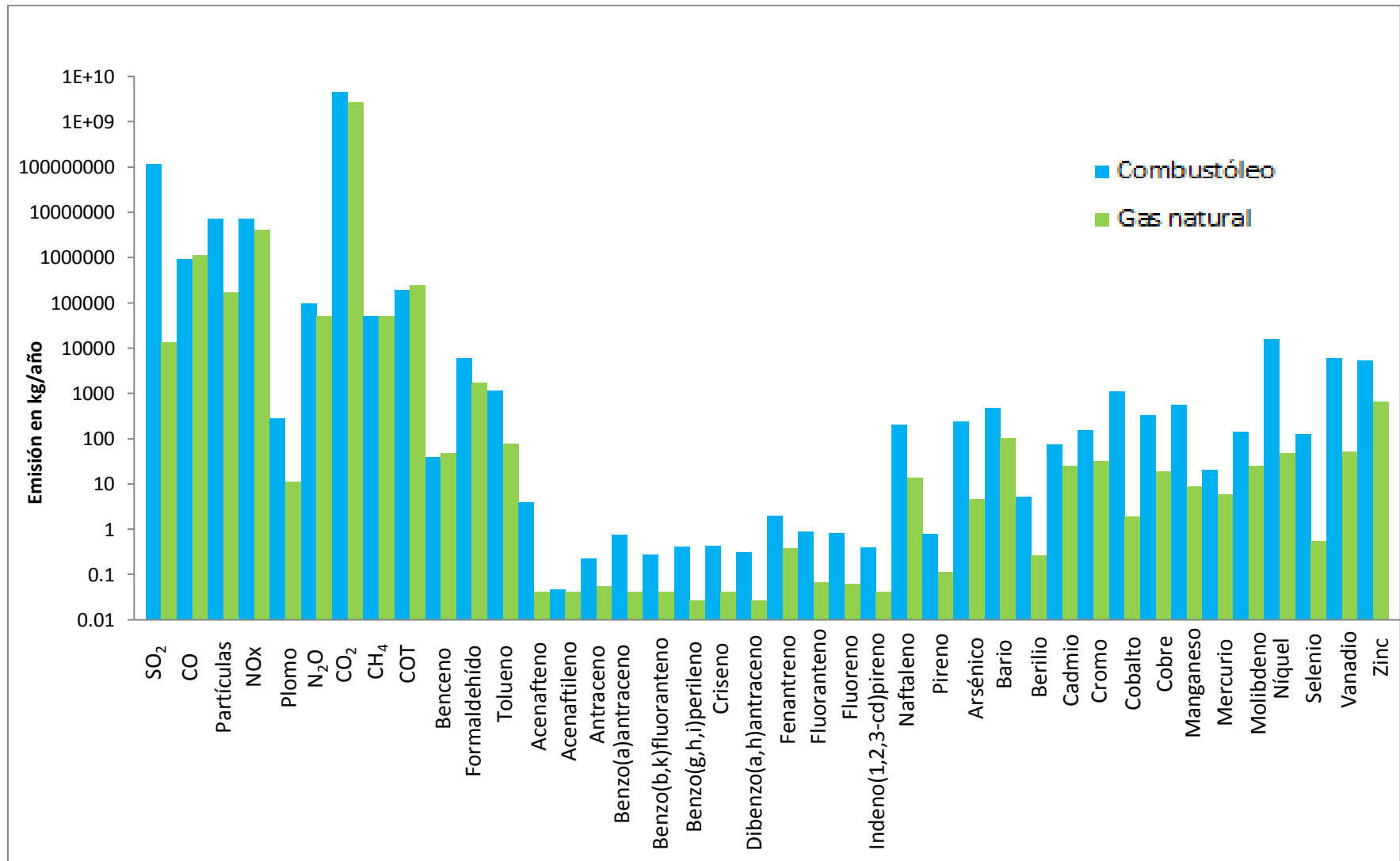


Figura 5. 41 Resumen de emisión de contaminantes con ambos combustibles.

CAPÍTULO 6. EVALUACIÓN DE RESULTADOS

6.1 Análisis de resultados

Con base a las emisiones estimadas mediante la metodología de FE, se identificó que el uso de combustóleo produce más emisiones de la mayoría de los cuarenta contaminantes estudiados, con excepción del monóxido de carbono, en las unidades con configuración frontal (unidades 3 y 4), metano, compuestos orgánicos totales y benceno cuya emisión es mayor utilizando gas natural.

En el caso del monóxido de carbono, el factor de emisión en unidades con configuración frontal o normal es casi cuatro veces mayor que en las unidades con configuración tangencial, para el caso de gas natural. Las unidades con configuración tangencial favorecen la combustión eficiente, por lo que la cantidad de monóxido de carbono se reduce, lo contrario ocurre con la configuración frontal que favorece la formación de CO. Además, las emisiones de este contaminante pueden llegar a incrementar varios órdenes de magnitud si el mantenimiento a las unidades no es el adecuado y si la combustión es incompleta.

El incremento en la emisión de metano es ocasionado por la composición del gas natural que contiene un 89% de metano, por lo que parte del gas natural no quemado es emitido desde la fuente a la atmósfera.

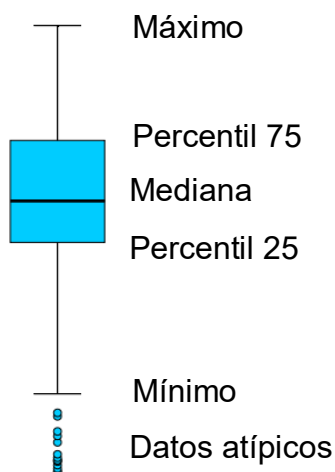
Los compuestos orgánicos totales incrementan, ya que además de los compuestos calculados en este trabajo, existen otros compuestos orgánicos de bajo peso molecular que se obtienen por la quema de gas natural como son: etano, propano, butano, pentano y hexano, que son considerados dentro de esta categoría.

6.1.1 Análisis estadístico de la distribución de los datos.

Con los resultados anteriores solo se puede identificar el combustible que emite menor cantidad de los contaminantes seleccionados. Sin embargo, es necesario conocer cómo se distribuyen y cuál es el comportamiento de los datos obtenidos.

Para poder analizar cómo se distribuyen los datos de emisión, es necesario realizar otro tipo de gráficas, como lo son los diagramas de caja.

Estos gráficos son de gran utilidad ya que muestran el comportamiento típico de las emisiones calculadas y presentan además los siguientes estadísticos descriptivos:



Máximo: Representa el comportamiento de eventos extraordinarios de emisión del contaminante.

Percentil 75: Valor abajo del cual se encuentran el 75% de los eventos.

Mediana o Percentil 50: Valor que divide en dos partes iguales el total de registros. Caracteriza el comportamiento de valores típicos, tiene mayor sensibilidad a su posible aumento.

Percentil 25: Valor abajo del cual se encuentran el 25% de los eventos.

Mínimo: Representa el comportamiento de eventos extraordinarios de emisión del contaminante.

Datos atípicos: Son valores extremadamente grandes o pequeños dentro del conjunto de datos.

Para todos los contaminantes se elaboraron dos diagramas de caja (uno para combustóleo y otro para gas natural), en los cuales se muestran las 5 unidades de generación durante los días de operación. Para la elaboración de estos diagramas se utilizó el software IBM-SPSS Statistics. Estos diagramas se presentan junto con una tabla de estadísticos descriptivos.

En las tablas de estadísticos descriptivos, N indica el número de días en operación de cada unidad (N), correspondiente a la tabla 5.1, también se muestran los valores mínimo, máximo, promedio, desviación estándar, incertidumbre y los percentiles 25,50 y 75 en kg/día. Las ecuaciones generales para algunas de las variables estadísticas anteriores se presentan a continuación (Miranda, 2000):

Media

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

Desviación Estándar

$$s(x_i) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

Donde:

\bar{x} = Promedio o media aritmética

n = número de datos

x_i = Valor diario de emisión del contaminante i

s = desviación estándar

u = incertidumbre

Incertidumbre

$$u(x_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}$$

A manera de ejemplo, se muestran a continuación los diagramas de caja para dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, dióxido de carbono y metano (figuras 6.1 a 6.4); estos contaminantes se eligieron por ser los más representativos del conjunto de contaminantes evaluados, además de los diagramas con ambos combustibles se muestran también sus respectivas tablas de estadísticos descriptivos (tablas 6.1 a 6.8), el resto de los contaminantes se presentan en el Anexo I.

Dióxido de azufre

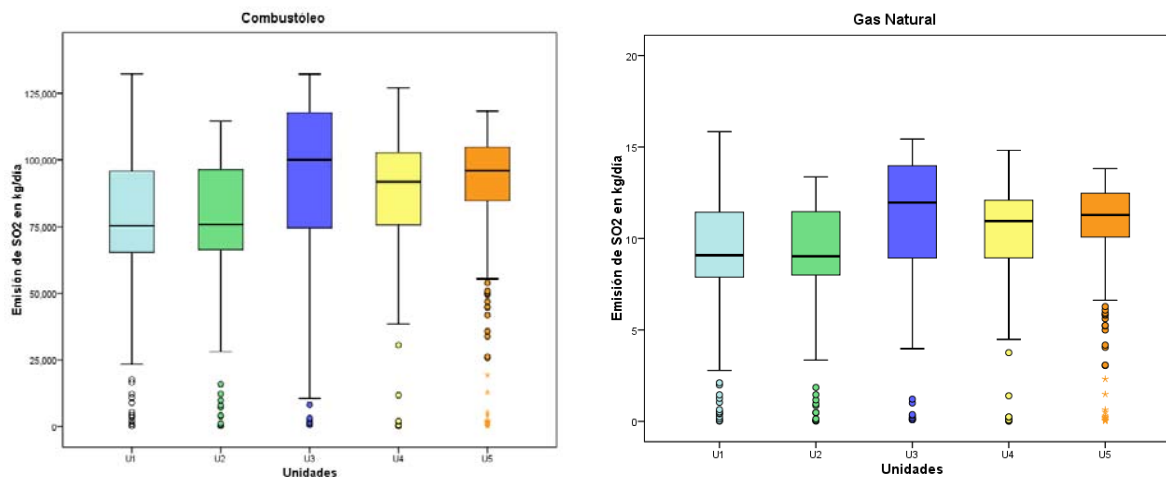


Figura 6. 1 Diagrama de caja para la emisión de SO₂ utilizando A) combustóleo B) gas natural.

Tabla 6. 1 Estadísticos descriptivos de emisión de SO₂ utilizando combustóleo.

	N(Días en operación)	Kg/día							
		Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Incertidumbre	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
U1	287	150.72	132330.27	79473.34	25689.25	1516.38	67974.72	80382.74	98384.36
U2	290	150.72	114696.04	79426.77	23646.59	1388.57	67747.69	79559.44	97456.03
U3	273	734.76	132256.80	93180.26	27424.07	1659.78	75496.59	99633.46	112504.01
U4	262	75.36	126981.60	86549.58	23762.99	1468.08	76172.01	92653.24	102678.00
U5	223	150.72	118390.56	87709.31	26879.32	1799.97	84621.74	95886.18	104825.76

Tabla 6. 2 Estadísticos descriptivos de emisión de SO₂ utilizando gas natural.

	N (Días en operación)	Kg/día							
		Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Incertidumbre	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
U1	287	0.0176	15.8399	9.4487	3.0352	0.1792	8.1091	9.6130	11.5743
U2	290	0.0176	13.7291	9.4492	2.7989	0.1644	8.1157	9.3448	11.6623
U3	273	0.0880	15.4354	11.0557	3.2169	0.1947	9.0193	11.8646	13.3641
U4	262	0.0088	14.8197	10.2671	2.7920	0.1725	8.9908	10.9982	12.0976
U5	223	0.0176	13.8171	10.4180	3.1840	0.2132	10.0792	11.2841	12.4802

Óxidos de Nitrógeno

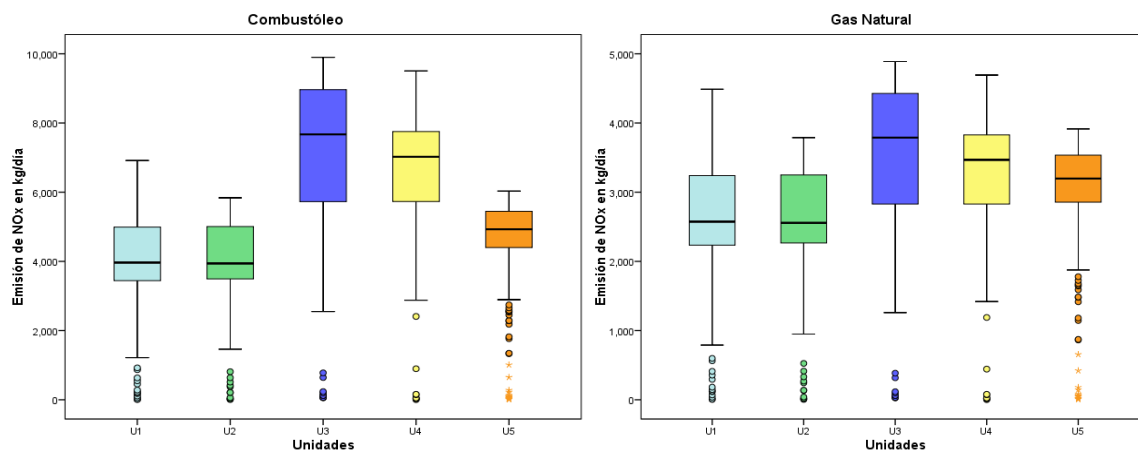


Figura 6. 2 Diagrama de caja para la emisión de NO_x utilizando A) combustóleo B) gas natural.

Tabla 6. 3 Estadísticos descriptivos de emisión de NO_x utilizando combustóleo.

	N (Días en operación)	Kg/día							
		Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Incertidumbre	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
U1	287	7.68	6915.84	4125.37	1325.19	78.22	3540.48	4197.12	5053.44
U2	290	7.68	5994.24	4125.59	1222.02	71.76	3543.36	4080.00	5091.84
U3	273	56.40	9898.20	7089.68	2062.88	124.85	5783.82	7608.36	8569.98
U4	262	5.64	9503.40	6583.99	1790.43	110.61	5765.49	7052.82	7757.82
U5	223	7.68	6032.64	4548.59	1390.15	93.092	4400.64	4926.72	5448.96

Tabla 6. 4 Estadísticos descriptivos de emisión de NO_x utilizando gas natural.

	N (Días en operación)	Kg/día							
		Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Incertidumbre	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
U1	287	4.98	4487.98	2677.13	859.97	50.76	2297.57	2723.69	3279.39
U2	290	4.98	3889.91	2677.27	793.02	46.57	2299.44	2647.68	3304.31
U3	273	27.85	4887.86	3500.98	1018.68	61.65	2856.13	3757.11	4231.97
U4	262	2.79	4692.90	3251.26	884.14	54.62	2847.07	3482.78	3830.91
U5	223	4.98	3914.83	2951.77	902.13	60.41	2855.76	3197.16	3536.06

Dióxido de Carbono

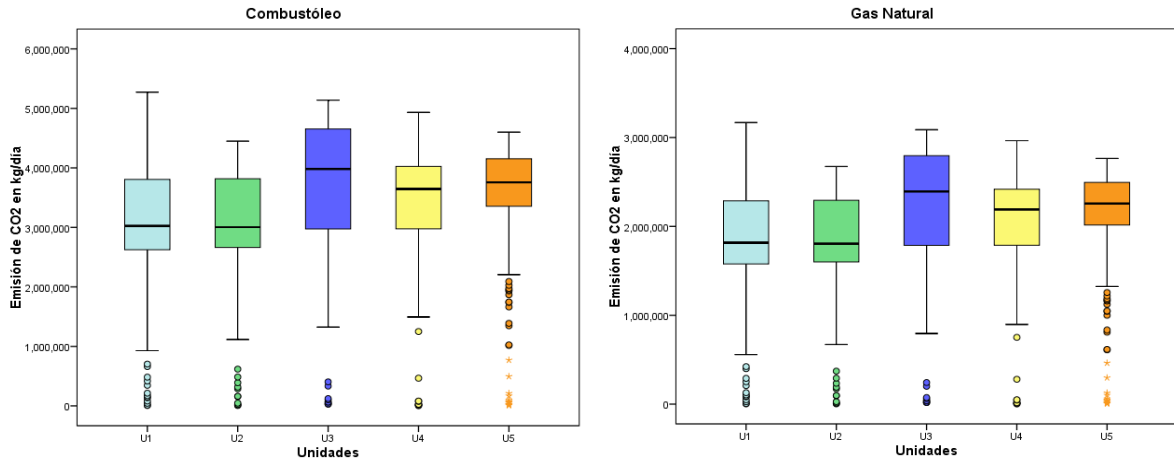


Figura 6. 3 Diagrama de caja para la emisión de CO₂ utilizando A) combustóleo B) gas natural.

Tabla 6. 5 Estadísticos descriptivos de emisión de CO₂ utilizando combustóleo.

	N (Días en operación)	Kg/día							
		Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Incertidumbre	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
U1	287	5856	5273328	3145600.39	1010458.69	59645.49	2699616	3200304	3853248
U2	290	5856	4570608	3145762.43	931787.04	54716.42	2701812	3111000	3882528
U3	273	29280	5138640	3680603.25	1070943.76	64816.46	3002664	3949872	4449096
U4	262	2928	4933680	3418071.21	929500.25	57424.72	2993148	3661464	4027464
U5	223	5856	4599888	3468301.35	1059991.44	70982.27	3355488	3756624	4154832

Tabla 6. 6 Estadísticos descriptivos de emisión de CO₂ utilizando gas natural.

	N(Días en operación)	Kg/día							
		Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Incertidumbre	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
U1	287	3518.03	3167985.09	1889739.29	607039.44	35832.41	1621811.35	1922602.83	2314863.06
U2	290	3518.03	2745821.61	1889836.64	559776.95	32871.23	1623130.62	1868952.89	2332453.21
U3	273	17590.14	3087070.42	2211145.64	643376.23	38938.90	1803869.35	2372910.54	3672822.51
U4	262	1759.01	2963939.41	2053427.86	558403.14	34498.26	1798152.56	2199647.61	2419524.42
U5	223	3518.03	2763411.76	2083603.93	636796.55	42643.05	2015830.60	2256815.58	2496041.55

Metano

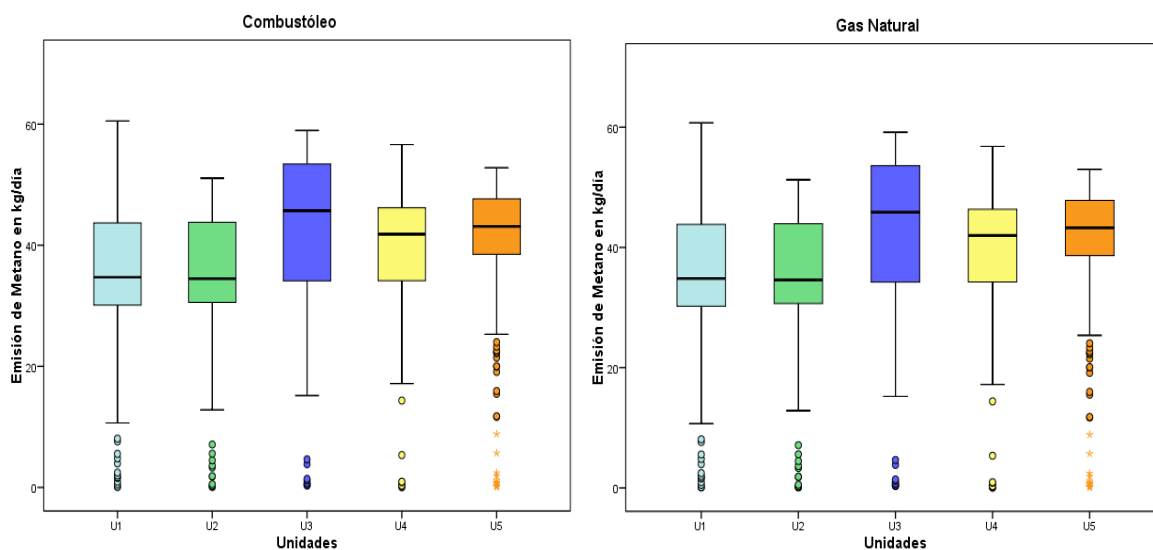


Figura 6. 4 Diagrama de caja para la emisión de CH₄ utilizando A) combustóleo B) gas natural.

Tabla 6. 7 Estadísticos descriptivos de emisión de CH₄ utilizando combustóleo.

	N(Días en operación)	Kg/día							
		Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Incertidumbre	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
U1	287	0.067	60.514	36.097	11.595	0.684	30.979	36.725	44.217
U2	290	0.067	52.449	36.098	10.692	0.627	31.004	35.700	44.553
U3	273	0.336	58.968	42.236	12.289	0.744	34.456	45.326	51.055
U4	262	0.034	56.616	39.224	10.666	0.658	34.347	42.016	46.216
U5	223	0.067	52.785	39.800	12.164	0.814	38.505	43.108	47.678

Tabla 6. 8 Estadísticos descriptivos de emisión de CH₄ utilizando gas natural.

	N(Días en operación)	Kg/día							
		Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Incertidumbre	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
U1	287	0.067	60.720	36.220	11.635	0.687	31.085	36.850	44.368
U2	290	0.067	52.628	36.222	10.729	0.630	31.110	35.822	44.705
U3	273	0.337	59.169	42.380	12.331	0.746	34.574	45.481	51.229
U4	262	0.034	56.809	39.357	10.703	0.661	34.465	42.160	46.374
U5	223	0.067	52.965	39.936	12.205	0.817	38.637	43.256	47.841

Se observa que la desviación estándar es muy grande porque cada una de las emisiones depende del consumo diario de combustible. Este comportamiento se observa en cada uno de los contaminantes, debido a que la central termoeléctrica no opera a carga constante, sino que la carga depende de la demanda de electricidad requerida y el número de unidades disponibles.

6.1.2 Análisis de la variabilidad de los datos.

Dentro del conjunto de datos de consumo de combustible existe cierta variación dependiendo de la unidad de generación de la que se trate. Es común encontrar reportados valores de emisiones anuales, sin embargo, estos datos no podrían funcionar para tomar decisiones con respecto a reconfiguración de las unidades, implementación de equipos de control o para evaluar impactos de la emisión de una fuente. En este apartado se muestra la variación que existe entre considerar datos anuales o diarios, esto puede observarse mediante la aplicación del porcentaje de diferencia relativa:

$$PDR = \frac{X_1 - X_2}{\bar{X}}$$

Donde:

$X_1 =$ Emisión diaria del contaminante

$X_2 =$ Emisión promedio anual

$\bar{X} =$ Promedio de X_1 y X_2

Este estadístico sirve para poder identificar la diferencia existente entre utilizar el promedio anual de todos los datos o los valores de emisión diarios, ya que podría darse el caso de que se sobrestimen o subestimen las emisiones generadas por la Central Termoeléctrica “Francisco Pérez Ríos”. Por ejemplo, esto es importante si se requiere alimentar estos datos a un modelo de dispersión, para estudios posteriores (Bravo et al., 2011). A continuación se muestra gráficamente el porcentaje de variación de las emisiones totales de dióxido de azufre durante el año 2010, con el uso de combustóleo y gas natural en las figuras 6.5 y 6.6 respectivamente.

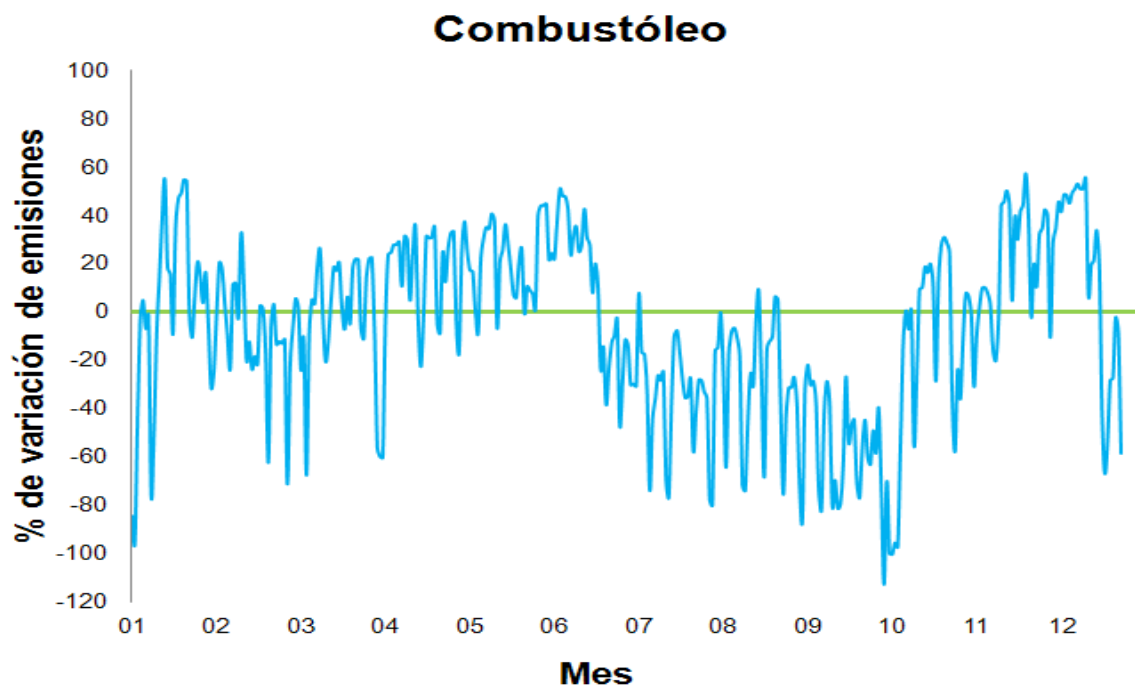


Figura 6. 5 Porcentaje de diferencia relativa de las emisiones de SO₂ utilizando combustóleo.

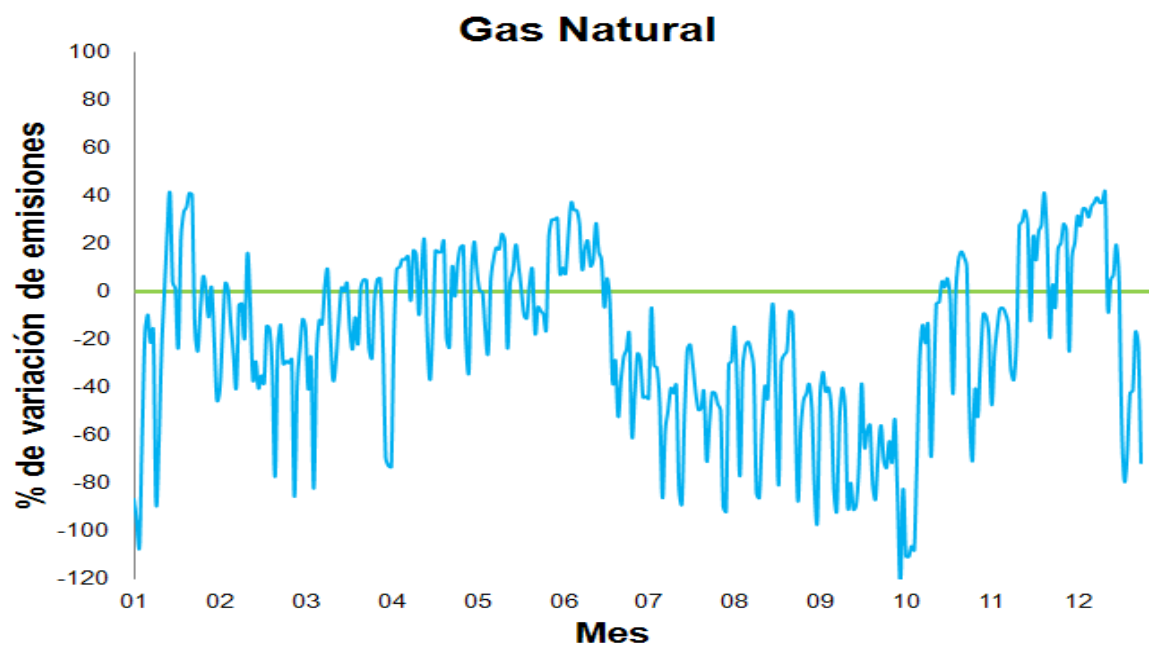


Figura 6. 6 Porcentaje de diferencia relativa de las emisiones de SO₂ utilizando gas natural.

Se consideró la variación de dióxido de azufre, por ser el principal contaminante que se reduce al cambiar el combustible. Como se puede observar la tendencia de la variación es igual para ambos combustibles, ya que solo dependerá de la cantidad de combustible (combustóleo o gas natural) utilizada para cada uno de los días del periodo de estudio, considerando que se genera la misma cantidad de energía y la eficiencia de conversión de cada combustible. En las figuras anteriores se observa que el contar con datos diarios de consumo de combustible es una ventaja para poder estimar las emisiones con un menor intervalo de error.

Como se ha mencionado a lo largo de este trabajo, las unidades no operan de forma continua durante todo el año, por lo que también se realizó el análisis de la variación de las emisiones, utilizando los datos de todos los días del año para cada unidad de generación (incluyendo los días que no trabajó cada unidad), así como incluyendo solamente los datos de los días de operación (figuras de la 6.7 a 6.16):

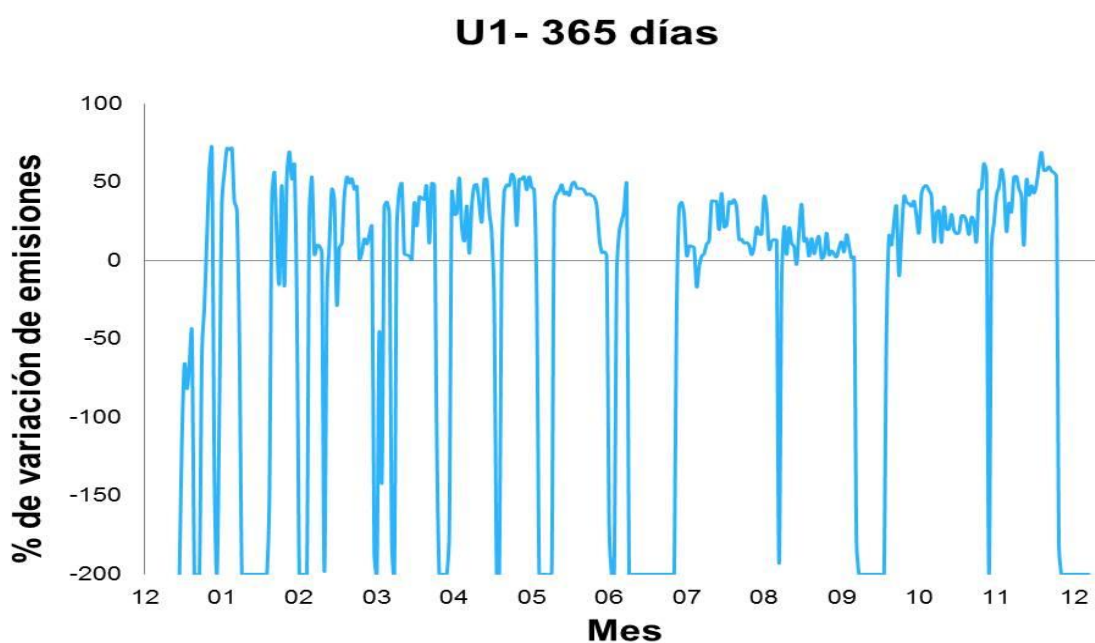


Figura 6. 7 Porcentaje de diferencia relativa de las emisiones de SO₂ de la Unidad 1, considerando los 365 días.

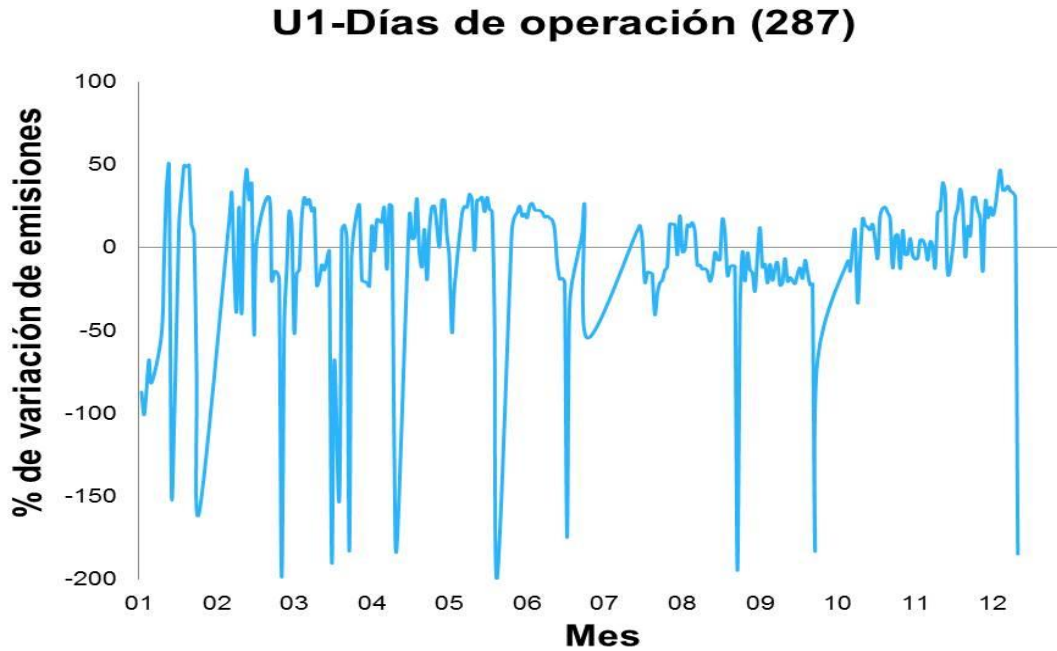


Figura 6. 8 Porcentaje de diferencia relativa de las emisiones de SO₂ de la Unidad 1, considerando sólo los días de operación de la unidad.

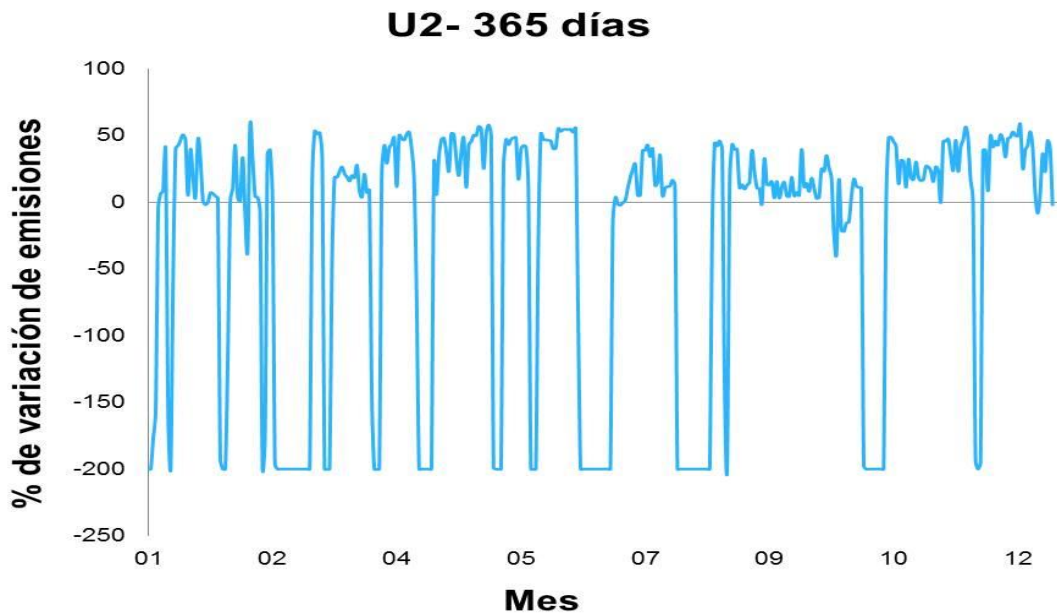


Figura 6. 9 Porcentaje de diferencia relativa de las emisiones de SO₂ de la Unidad 2, considerando los 365 días.

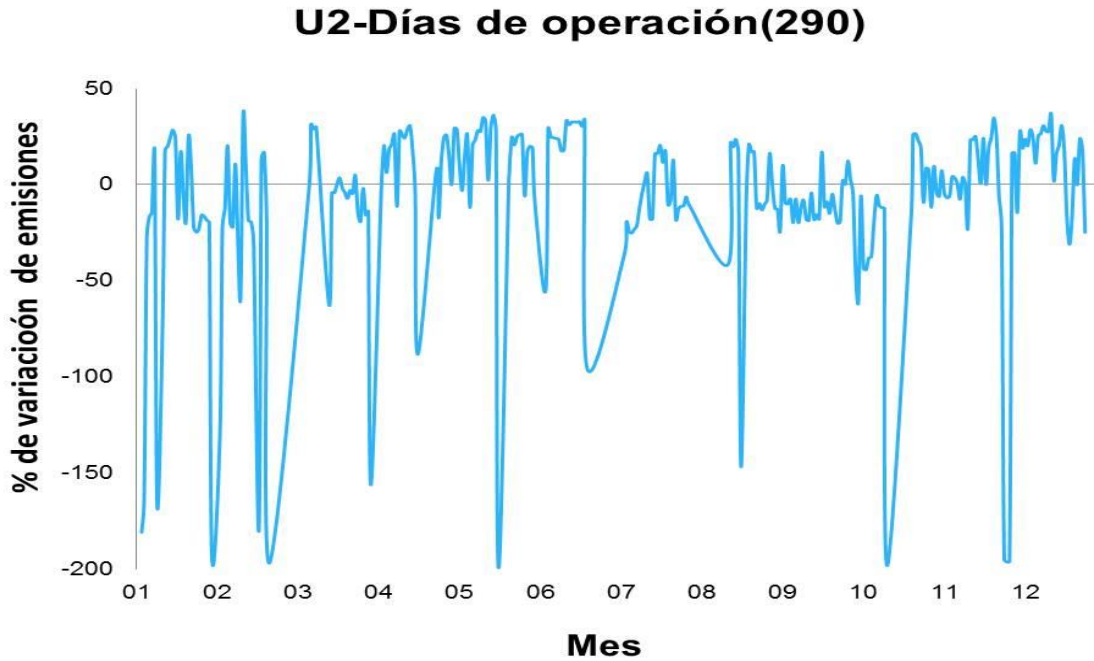


Figura 6. 10 Porcentaje de diferencia relativa de las emisiones de SO₂ de la Unidad 2, considerando sólo los días de operación de la unidad.

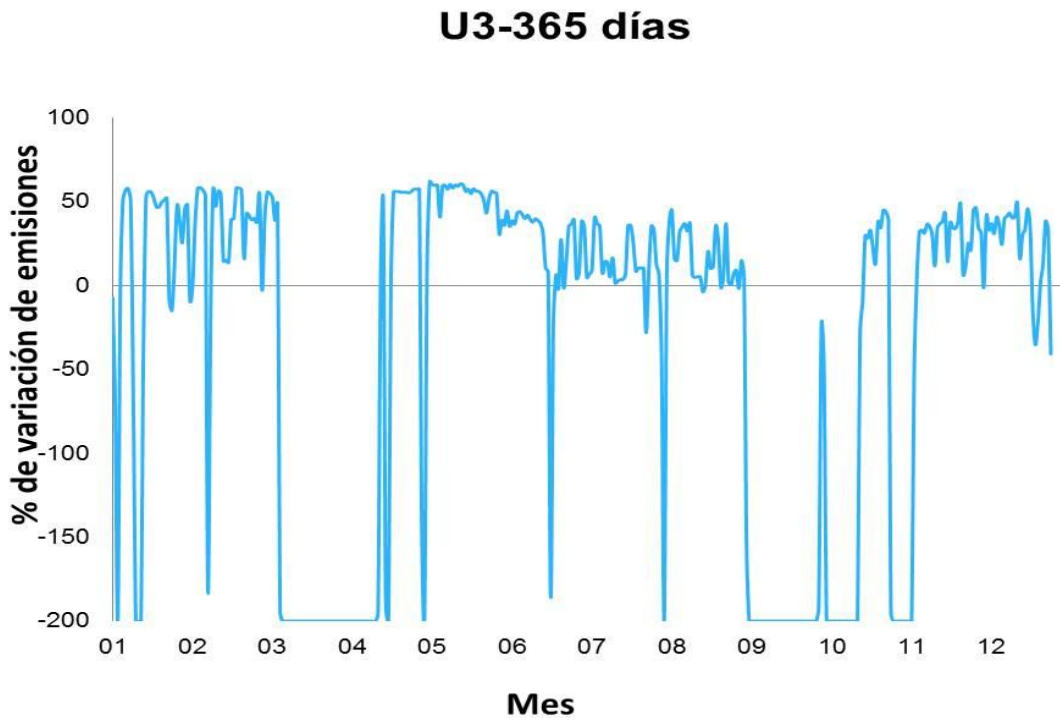


Figura 6. 11 Porcentaje de diferencia relativa de las emisiones de SO₂ de la Unidad 3, considerando los 365 días.

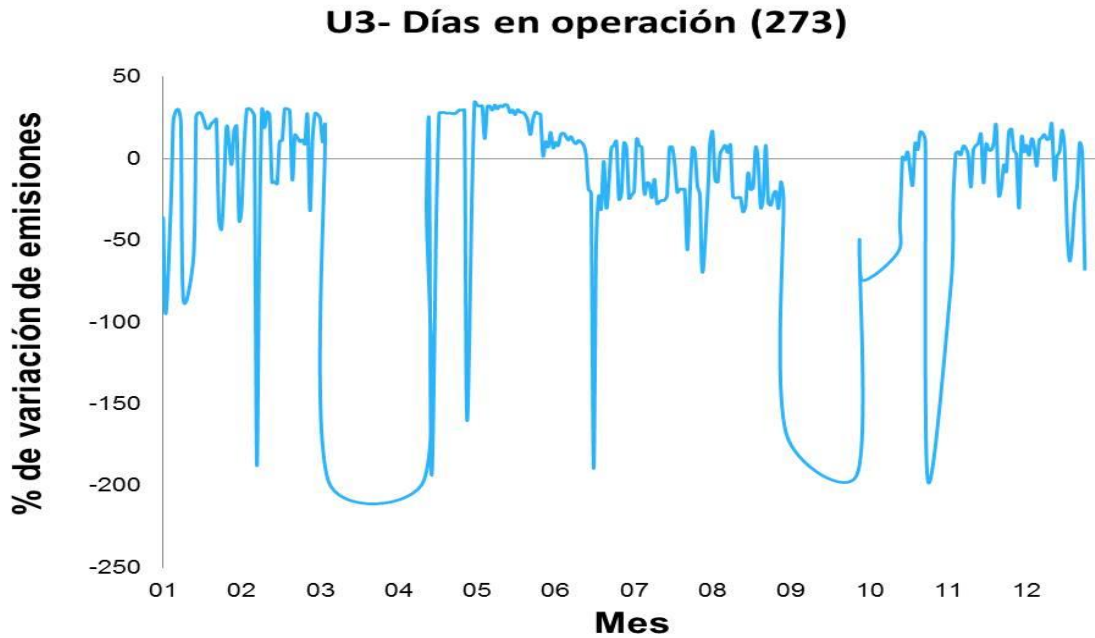


Figura 6. 12 Porcentaje de diferencia relativa de las emisiones de SO₂ de la Unidad 3, considerando sólo los días de operación de la unidad.

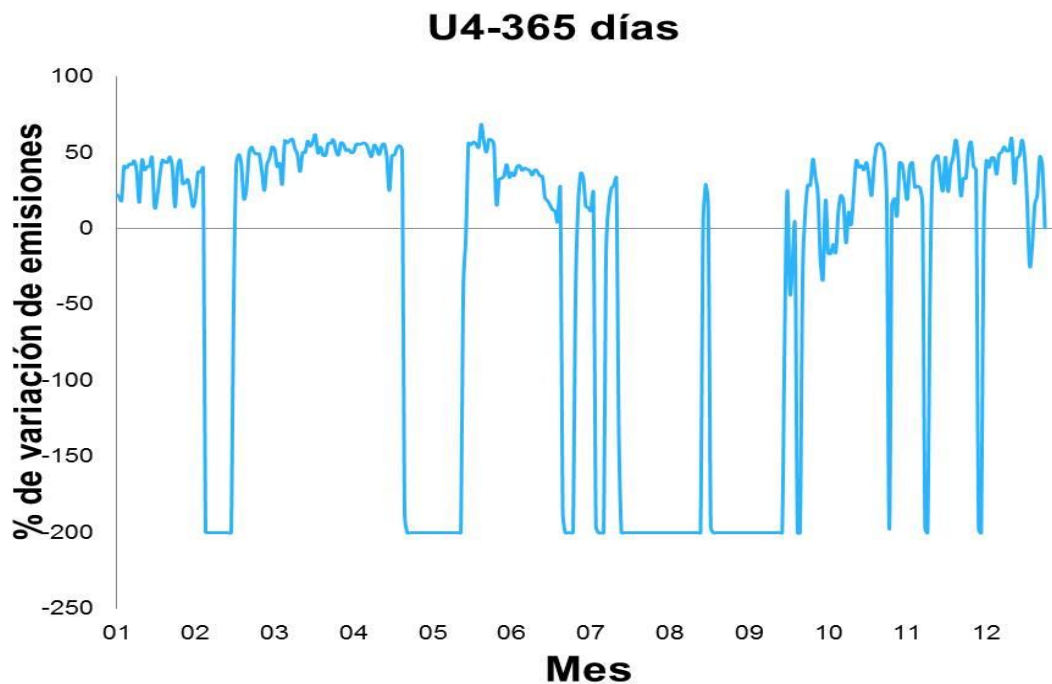


Figura 6. 13 Porcentaje de diferencia relativa de las emisiones de SO₂ de la Unidad 4, considerando los 365 días.

U4- Días en operación (262)

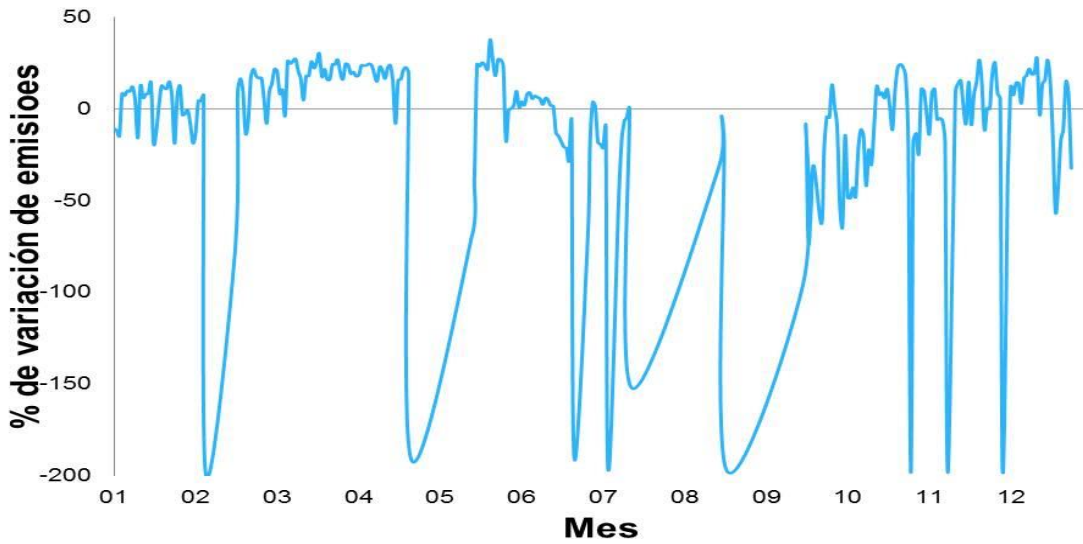


Figura 6. 14 Porcentaje de diferencia relativa de las emisiones de SO₂ de la Unidad 4, considerando sólo los días de operación de la unidad.

U5- 365 días

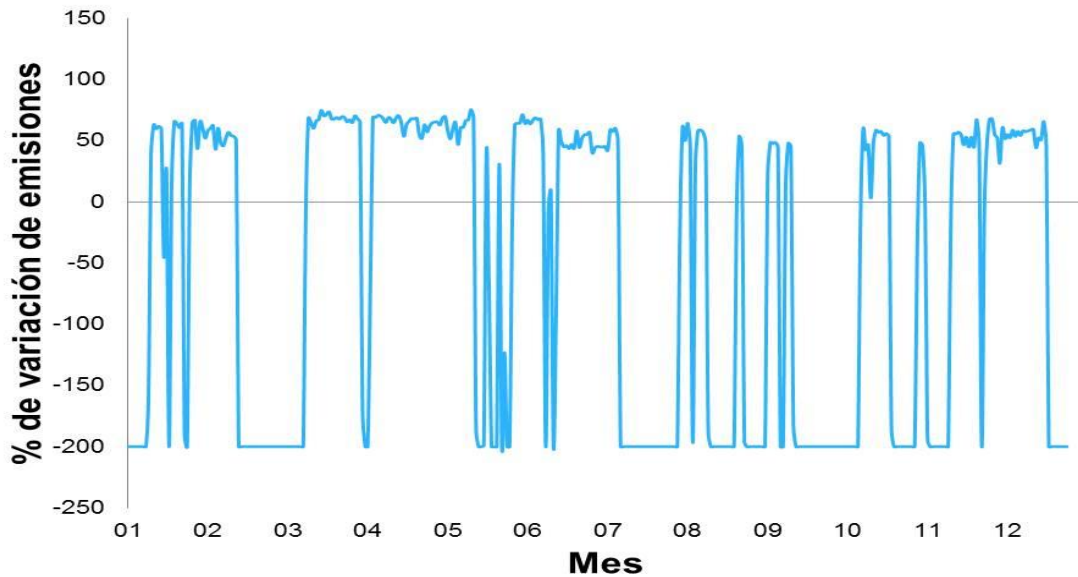


Figura 6. 15 Porcentaje de diferencia relativa de las emisiones de SO₂ de la Unidad 5, considerando los 365 días.

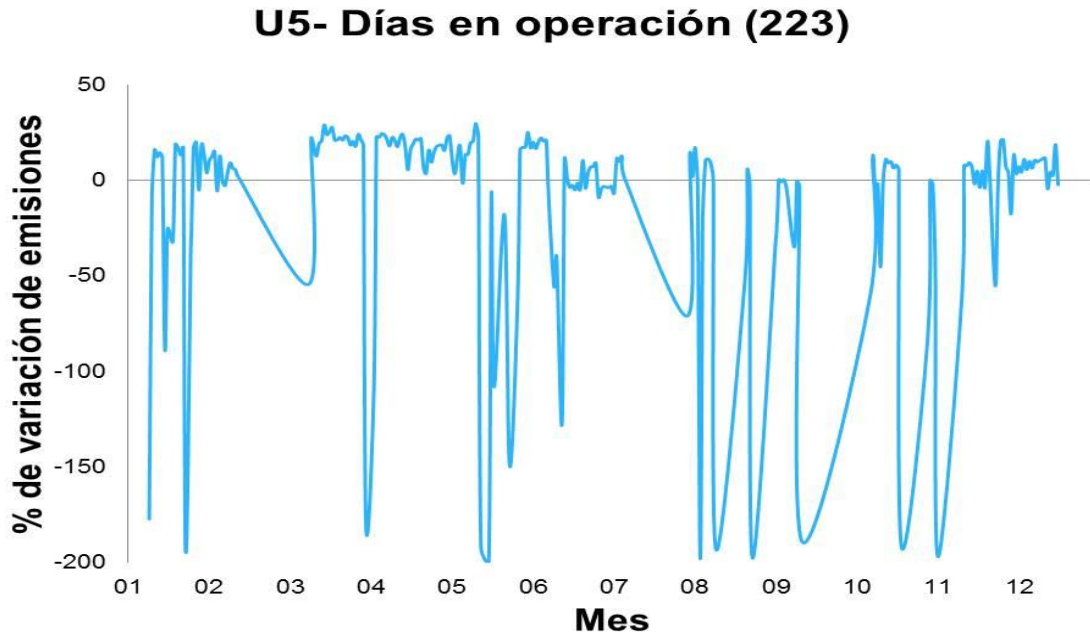


Figura 6. 16 Porcentaje de diferencia relativa de las emisiones de SO₂ de la Unidad 5, considerando sólo los días de operación de la unidad.

En las figuras anteriores(6.7 a 6.16), se nota claramente la diferencia entre utilizar los datos sobre las emisiones de los días en que las unidades estuvieron en operación; o utilizar los datos diarios incluyendo aquellos días en los que estuvieron fuera de servicio, con respecto al promedio en cada uno de los casos. Esto se recomienda principalmente para evitar que se generen errores al momento de utilizar los datos para tomar decisiones sobre medidas de reducción de emisiones. Por lo anterior es muy importante considerar la variación temporal de las emisiones y la variación de la capacidad térmica por unidad de generación.

CAPÍTULO 7. BENEFICIOS DE LA SUSTITUCIÓN DE COMBUSTIBLE

7.1 Identificación de posibles beneficios en el ambiente y en el proceso.

El cambio de combustible ocasionaría efectos no sólo en el proceso y en la operación de los generadores de vapor, sino también en el medio ambiente, los cuales se identificarán en las siguientes secciones.

7.1.1 Beneficios en el ambiente

A partir de la estimación de emisiones llevada a cabo en la presente investigación podemos identificar algunos de los principales impactos ambientales potenciales.

El SO₂ junto con los NO_x al ser emitidos a la atmósfera se oxidan formando los iones sulfatos y nitratos respectivamente, los cuales ocasionan un impacto adverso acidificando el depósito atmosférico. La clara reducción en las emisiones de estos contaminantes, conlleva a una disminución del fenómeno de lluvia ácida, previniendo los efectos negativos en el ambiente y materiales.

Un ejemplo de este impacto, es el caso de Estados Unidos que desde 1990 implementó medidas de reducción de emisiones de SO₂ y NO_x y con el paso de los años se han observado disminuciones significativas en la cantidad de iones nitratos y sulfatos, y por ende se observa una reducción en el depósito atmosférico ácido (Lehmann et al., 2015). Cabe mencionar que dicha investigación cuenta con información anual de emisiones, calidad del aire y depósito atmosférico por varias décadas, sería importante desarrollar trabajos equivalentes para México.

En cuanto a gases de efecto invernadero, el principal beneficio es que la combustión de gas natural produce una menor cantidad de CO₂, disminuyendo así la contribución que el sector eléctrico aporta al efecto invernadero por este contaminante. Sin embargo, esto puede actuar de manera negativa si la combustión no se lleva a cabo de manera adecuada y si se liberan grandes

cantidades de combustible no quemado (compuesto mayoritariamente por metano) el cual también es considerado un gas de efecto invernadero, cuyo impacto en el calentamiento global es mayor por su alto potencial de calentamiento comparándolo con el CO₂.

Las emisiones teóricas estimadas para el uso de gas natural, indican una disminución de 36 de los 40 contaminantes estudiados; esta reducción mejorará la calidad del aire de la región y de las zonas en donde por factores meteorológicos impacta directamente. Así mismo, la población localizada en la zona de influencia por la operación de la CTFPR resultará beneficiada al mejorar la calidad del aire, por varios contaminantes atmosféricos como es el caso del SO₂.

7.1.2 Beneficios en el proceso

El transporte y almacenamiento de los combustibles no siempre es igual, en el caso del combustóleo, la CTFPR almacena su combustible en tanques para su uso en las diferentes unidades de generación de electricidad. Ahora al implementar el cambio de combustible, es necesaria la construcción de un ducto de transporte y abastecimiento a las unidades. Los tanques de almacenamiento ocupan una extensa área al ser de gran capacidad, sin embargo al sustituir en su totalidad el combustible, esos tanques dejarán un área que puede ser destinada a otras actividades; aunque es importante mantener almacenado combustóleo en caso de falla en el suministro de gas.

La combustión de combustóleo produce una mayor cantidad de partículas que se presentan en forma de hollín y que generalmente se depositan en la base de la chimenea, estas partículas pueden contener cierta cantidad de azufre por el elevado contenido en el combustóleo, el cual al entrar en contacto con agua produce ácido sulfúrico que corroe las paredes metálicas, problema que se resuelve al sustituir el combustible, ya que las cantidades de azufre obtenidas por la combustión de gas natural son insignificantes comparadas con las producidas con combustóleo.

Con la disminución en la cantidad de hollín, se previene que este se acumule en las superficies de transferencia de calor, por lo que no actuará como un aislante y evitará un mayor consumo de combustible.

Al producir una combustión más limpia y sin compuestos corrosivos de azufre, resulta ser un combustible menos agresivo a la caldera, lo cual puede verse reflejado en menos paros de equipo y menores costos por mantenimiento (Arroyo, 2005).

Otras diferencias que pueden llegar a intervenir en el proceso, pero no necesariamente de manera benéfica son las siguientes:

La diferencia en el poder calorífico de los combustibles (el poder calorífico del combustóleo es mayor), así como la eficiencia de conversión de ambos combustibles, hace que las cantidades de combustible sean diferentes en el caso supuesto de que se requiera generar la misma cantidad de electricidad.

A lo largo del proceso se deben implementar medidas de seguridad más estrictas con el uso de gas natural que las actualmente disponibles al manejar combustóleo, ya que por sus características de alta inflamabilidad (Número 4 en el Rombo de Clasificación de Riesgos NFPA-704), puede ocasionar un incendio o explosión (PEMEX, 2000).

Diferente relación aire-combustible, por lo que se deberá modificar la operación del ventilador de tiro forzado, para que la cantidad de aire que entra al proceso sea la adecuada para garantizar la combustión completa y la reducción de emisiones de combustible no quemado, sin afectar la eficiencia del generador de vapor.

CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1 Conclusiones

La metodología empleada para el cálculo de emisiones en esta investigación fue por factores de emisión desarrollados por la US-EPA, utilizando datos de consumo real de combustible diarios por unidad de generación para la CTFPR, durante el año 2010.

El uso y manejo de FE, no debe ser arbitrario ya que estos valores son promedios de diferentes pruebas realizadas en plantas en Estados Unidos; además se debe considerar la disponibilidad de información necesaria para aplicar las ecuaciones correspondientes y el tipo de prueba con que se desarrollaron estos factores.

Esta metodología es considerada adecuada para la estimación de emisiones debido a su bajo costo y facilidad de implementación.

Es importante recalcar la importancia de utilizar datos de consumo de combustible diarios por unidad de generación, ya que se podrían subestimar o sobrestimar los resultados de las emisiones. El utilizar un promedio mensual o anual de los datos, podría llevar a generar un error al intentar estimar las emisiones, por ello se recomienda dar un intervalo de empleo.

Es importante conocer la posición de los quemadores en cada generador de vapor, ya que es un factor a considerar al utilizar los factores de emisión para estimar las emisiones de NO_x y CO , por las condiciones de temperatura que se favorecen con cada configuración, lo cual afecta la estabilidad de la combustión.

El balance energético desarrollado muestra la diferencia en las cantidades de combustible, siendo el gas natural el que requiere mayor cantidad por su poder calorífico, para generar la misma cantidad de electricidad aun cuando se considera la eficiencia de conversión del combustible.

La sustitución de combustóleo a gas natural es una buena opción debido a las altas emisiones de SO_2 con el consumo de combustóleo, ya que la sustitución implica la reducción de un 99.98% de este contaminante por lo cual se espera una mejora en la calidad del aire por SO_2 , así como una menor contribución al fenómeno de lluvia ácida.

Se determinó que la mayoría de las emisiones de contaminantes disminuyen con la sustitución de combustible, sin embargo los contaminantes: monóxido de carbono, compuestos orgánicos totales, metano, y benceno, aumentan con gas natural, en los siguientes porcentajes: el monóxido de carbono aumenta su emisión en un 17.14%, los compuestos orgánicos totales aumentan un 22.6%, el metano en un 0.33% y benceno en 16.57%.

Los resultados obtenidos comprueban que el gas natural es un combustible más limpio comparándolo con el combustóleo, al generar menos emisiones de la mayoría de los contaminantes evaluados. Sin embargo se debe poner especial atención en aquellos contaminantes que incrementan, principalmente el monóxido de carbono, metano, los compuestos orgánicos y el benceno, que actúan como precursores de ozono.

Además de los daños en el ambiente el aumento de estos contaminantes podría ocasionar daños en la salud de la población, como en el caso del monóxido de carbono que puede causar el aumento de casos de intoxicación, así como el benceno que al ser inhalado en grandes cantidades puede producir anemia, o al formar ozono estos contaminantes pueden provocar daños en las vías respiratorias.

Un aspecto importante a considerar es el incremento en las emisiones de metano, ya que a este compuesto se le atribuye un alto potencial de calentamiento global. Sin embargo, a pesar de que las emisiones de metano son mayores utilizando gas natural, el aumento no es significativo y la cantidad de CO_2 equivalente es menor con respecto al uso de combustóleo.

Existe variabilidad dentro del conjunto de datos estudiados, ya que las emisiones presentan una variación anual, mensual, estacional, así como por unidad de generación; esta variabilidad debe ser considerada al momento de proponer medidas de reducción de emisiones.

8.2 Recomendaciones

Se recomienda cambiar la configuración de los quemadores frontales a quemadores tangenciales, con la finalidad de reducir la temperatura de combustión y por ende, disminuir las emisiones de óxidos de nitrógeno y reducir las pérdidas por combustible no quemado, logrando así mejorar la eficiencia de la combustión.

A nivel federal se propone comenzar a desarrollar factores de emisión basados en procesos para el caso de México, para poder tener valores que se ajusten mejor a las condiciones de operación de las centrales termoeléctricas y otros procesos industriales del país y que sirvan para determinar la magnitud de las emisiones de los diferentes contaminantes.

Con el desarrollo de factores de emisión aplicables a México, se podrían identificar áreas de mejora en los procesos y en la legislación ambiental actual, para poder contribuir a la mejora de la calidad del aire y beneficiar la salud de la población.

Es recomendable que las entidades públicas correspondientes (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales y la Secretaría de Salud), enfoquen su atención en los contaminantes tóxicos (benceno, formaldehído, tolueno y contaminantes inorgánicos), ya que no se dispone de Normas Oficiales Mexicanas en materia de emisión de contaminantes tóxicos por centrales termoeléctricas, ya que representan un riesgo potencial para la salud de la población expuesta.

Se sugiere elaborar un análisis económico para determinar el beneficio que tiene la sustitución del combustible, no sólo en el precio del nuevo combustible, sino también considerando la reconfiguración de los quemadores, los gastos de construcción del ducto de transporte de gas natural, la operación y mantenimiento

de las unidades de generación; así como para determinar el plazo de recuperación de la inversión requerida.

Para estudios posteriores se recomienda conocer el poder calorífico por lote para disminuir la incertidumbre de la estimación de emisiones.

Se sugiere que se tomen medidas para evitar fugas de gas natural, ya que al ser su principal constituyente metano, el efecto que este contaminante tiene al cambio climático por su alto potencial de calentamiento, puede ser 33 veces mayor que el producido por las altas emisiones de CO₂.

Se recomienda la instalación de equipos de seguridad para el manejo de gas natural, por la alta inflamabilidad característica de este combustible, para prevenir problemas de accidentes por incendios y explosiones.

Es necesario monitorear las emisiones generadas con gas natural, para determinar el porcentaje de reducción real o el aumento en caso de presentarse y de esta manera poder considerar la instalación de algún otro equipo de control. Se sugiere poner especial atención en las emisiones de NO_x ya que estas pueden contribuir a la contaminación atmosférica fotoquímica en las regiones al sur de la Zona de Tula.

BIBLIOGRAFÍA

Arroyo C.V., (2005). *Beneficios de la conversión a gas natural en calderas de vapor*. Perú. Recuperado de <http://www.cinydesac.com/>

ATSDR, Agency for Toxic Substances and Disease (1995). *Toxicological Profile for Polycyclic Aromatic Hydrocarbons*. Atlanta, GA: US. Department of Health and Human Services. Public Health Service.

ATSDR, Agency for Toxic Substances and Disease Registry (1999). *Toxicological Profile for Mercury*. Atlanta, GA: US. Department of Health and Human Services. Public Health Service.

ATSDR, Agency for Toxic Substances and Disease Registry (2000). *Toxicological Profile for Toluene*. Atlanta, GA: US. Department of Health and Human Services. Public Health Service.

ATSDR, Agency for Toxic Substances and Disease Registry (2002). *Toxicological Profile for Beryllium*. Atlanta, GA: US. Department of Health and Human Services. Public Health Service.

ATSDR, Agency for Toxic Substances and Disease Registry (2003). *Toxicological Profile for Selenium (Update)*. Atlanta, GA: US. Department of Health and Human Services. Public Health Service.

ATSDR, Agency for Toxic Substances and Disease Registry (2004). *Toxicological Profile for Cobalt*. Atlanta, GA: US. Department of Health and Human Services. Public Health Service.

ATSDR, Agency for Toxic Substances and Disease Registry (2004). *Toxicological Profile for Copper*. Atlanta, GA: US. Department of Health and Human Services. Public Health Service.

ATSDR, Agency for Toxic Substances and Disease Registry (2005). *Toxicological Profile for Nickel (Update)*. Atlanta, GA: US. Department of Health and Human Services. Public Health Service.

ATSDR Agency for Toxic Substances and Disease Registry (2007). *Toxicological Profile for Arsenic (Update)*. Atlanta, GA: US. Department of Health and Human Services. Public Health Service.

ATSDR, Agency for Toxic Substances and Disease Registry (2007). *Toxicological Profile for Barium and Barium compounds*. Atlanta, GA: US. Department of Health and Human Services. Public Health Service.

ATSDR, Agency for Toxic Substances and Disease Registry (2007). *Toxicological Profile for lead (Update)*. Atlanta, GA: US. Department of Health and Human Services. Public Health Service.

ATSDR, Agency for Toxic Substances and Disease Registry (2007). *Toxicological Profile for Benzene*. Atlanta, GA: US. Department of Health and Human Services. Public Health Service.

ATSDR, Agency for Toxic Substances and Disease Registry (2009). *Toxicological Profile for Carbon monoxide*. Atlanta, GA: US. Department of Health and Human Services. Public Health Service.

ATSDR, Agency for Toxic Substances and Disease Registry (2012). *Toxicological Profile for Cadmium*. Atlanta, GA: US. Department of Health and Human Services. Public Health Service.

ATSDR, Agency for Toxic Substances and Disease Registry (2012). *Toxicological Profile for Chromium*. Atlanta, GA: US. Department of Health and Human Services. Public Health Service.

ATSDR, Agency for Toxic Substances and Disease Registry (2012). *Toxicological Profile for Manganese*. Atlanta, GA: US. Department of Health and Human Services. Public Health Service.

ATSDR, Agency for Toxic Substances and Disease Registry (2012). *Toxicological Profile for Vanadium*. Atlanta, GA: US .Department of Health and Human Services. Public Health Service.

ATSDR, Agency for Toxic Substances and Disease Registry (2012). *Toxicological Profile for Zinc (Update)*. Atlanta, GA: US. Department of Health and Human Services. Public Health Service.

Bravo A.H., Sosa E.R., Cureño G.I.V., Marin H.A., Sánchez A.P., Rosas A.S., Gonzalez H.P (2011). “*The importance of the pollutant emissions variation for the use in the emission inventories and application on dispersion models in Mexico*”. Orlando, Florida, USA.104th Annual Conference & Exhibition of the Air & Waste Management Association.

Bravo A.H., Sosa E.R., Alarcón J.A.L., Torres B. M.C., Sánchez A. P., Jaimes P.M Retama H.A., Granados H.E. (2015). “*Spatial and temporal variation of acid rain in Mexico City Metropolitan Zone*”. Rochester NY. USA Acid Rain 2015.

Carbajal, P., (2010). *Evaluación de la contaminación del aire por dióxido de azufre (SO₂) debido al uso de combustóleo en Tula, Hgo.* Tesis de Maestría. Instituto Politécnico Nacional.

Cârdu M., Baica M., (2002). *Regarding the greenhouse gas emissions of thermopower plants*. Romania. Energy Conversion and Management 43(2002) 2135-2144.

CCA-UNAM, MCE2, Centro de Ciencias de la Atmósfera-Universidad Nacional Autónoma de México, Molina Center for Energy and the Environment, (2010).*Temas emergentes en cambio climático: metano y carbono negro, sus posibles co-beneficios y desarrollo de planes de investigación*. México

CCA, Comisión para la Cooperación Ambiental (2011). *Emisiones Atmosféricas de las Centrales Eléctricas en América del Norte, Canadá*. Comisión para la Cooperación Ambiental.

CDC, Centers of Disease Control and Prevention (2013) *National Biomonitoring Program*. Recuperado el 13 de Noviembre del 2015, de <http://www.cdc.gov>.

CFE, Comisión Federal de Electricidad. (2014). *Datos técnicos de las principales centrales CFE en operación en 2014* Recuperado el 14 de Mayo del 2015, de <http://www.cfe.gob.mx>

CFE, Comisión Federal de Electricidad. (2014). *Informe Anual 2014*. Recuperado el 16 de Mayo del 2015, de <http://aplicaciones.cfe.gob.mx>

CONAMA, Comisión Nacional del Medio Ambiente (2009). *Guía metodológica para la estimación de emisiones atmosféricas de fuentes fijas y móviles en el registro de emisiones y transferencia de contaminantes*. Santiago de Chile.

Corvalán, R., Galecio, J., Salim, J., (2003). *Effectiveness in the Use of Natural Gas for the Reduction of Atmospheric Emissions: Case Study- Industrial Sector in the Metropolitan Region of Santiago, Chile*. Journal of the Air & Waste Management Association, 53: 8, 971-975.

Cureño G.I., (2010) *Determinación de factores de emisión aplicables a México para Centrales Termoeléctricas que consumen combustóleo como combustible*. Tesis de Maestría. Universidad Nacional Autónoma de México.

Cureño G.I., Bravo A. H., Sosa E.R. (2012). *The importance of the generation of emission factors for developing countries: Case of Mexico*. Journal of Environmental Science and Engineering. 1 (4). 495-502.

DOF, Diario Oficial de la Federación. (2012). *Ley General de Cambio Climático*. DOF 06-06-2012. México.

DOF, Diario Oficial de la Federación (2015) *Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente*. Última reforma publicada DOF 09-01-2015. México.

García, J.S., (2008). *Impacto del sector energético de Tula Hidalgo en la calidad del aire de la ZMVM*. Tesis de Licenciatura. Universidad Nacional Autónoma de México.

Gentile, G., Thiel, I., (2006) *El cambio climático y como mitigarlo. Instituto de estudios e investigaciones sobre el Medio Ambiente*. Argentina. Recuperado el 8 de Marzo del 2016, de <http://www.ambiente.gov.ar/>

Gobierno del Distrito Federal, Gobierno del estado de México, Gobierno del Estado de Hidalgo (2012) *Programa de Ordenación de la Zona Metropolitana del Valle de México*. México

Hernández, E., (2014). *Beneficios ambientales para la conversión de combustóleo a gas natural en generadores de Vapor*. Reporte de Estadía, Universidad Tecnológica de Tula Tepeji.

INE, Instituto Nacional de Ecología (2005). *Guía de elaboración y usos de inventarios de emisiones*. México. Recuperado el 12 de Noviembre, de <http://www2.inecc.gob.mx>

INE, Instituto Nacional de Ecología (2010). *Manual 1. Principios de Medición de Calidad del Aire*. México Instituto Nacional de Ecología.

INECC, Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (2013). *Contaminantes criterio*. México. Recuperado el 29 de Septiembre del 2015, de <http://www.inecc.gob.mx>.

INECC, Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (2013). *Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero 2013*. México. Recuperado el 10 de Enero de 2015, de <http://www.inecc.gob.mx>.

INECC, Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (2013). *Red Hidalguense de Monitoreo Atmosférico del estado de Hidalgo*. México. Recuperado el 7 de Febrero de 2016, de http://sinaica.ine.gob.mx/rama_hidalgo.html.

INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía Informática (2009). *Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos, Tula de Allende, Hidalgo*. México.

INC, Instituto Nacional del Cáncer (2016). *Formaldehído y el riesgo de cáncer*. Recuperado el 10 de Febrero de 2016, de <http://www.cancer.gov/>

Islas, J., Grande, G., (2007). *Optimization of alternative options for SO₂ emissions control in the Mexican electrical sector*. Energy Policy 35(9), 4495-4503.

Lehmann, C., Kerschner, B., Gay, D., (2015). *Impact of Sulfur Dioxide (SO₂) and Nitrogen Oxide (NO_x) Emissions Reductions on Acidic Deposition*. Pittsburgh, USA. EM Air & Waste Management Association,

MAVDT, (1998). *Guía Ambiental para Proyectos Carboeléctricos*. . Santa Fe de Bogotá Ministerio del medio ambiente. Recuperado el 25 de Octubre del 2015, de <http://www.siame.gov.co>.

Miller, P., Van Atten C. (2002). *North American Power Plant Air Emissions*. Canada, Estados Unidos. Commission for Environmental Cooperation of North America.

Miranda, J., (2000). *Evaluación de la Incertidumbre de datos experimentales*. México. Departamento de Física Experimental. Instituto de Física-UNAM.

National Library of Medicine, (2005). *Inquietudes de salud ambiental y sustancias químicas tóxicas en su lugar de residencia, trabajo y diversión*. USA. Recuperado el 13 de Noviembre del 2015, de <http://toxtown.nlm.nih.gov>

OMS, Organización Mundial de la Salud (2006). *Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre*. Suiza. Organización Mundial de la Salud.

PEMEX, Petróleos Mexicanos. (2000). *Hoja de datos de seguridad para sustancias químicas, Gas Natural*. México. Recuperado el 17 de Febrero 2016, de <http://www.gas.pemex.com.mx>.

PEMEX, Petróleos Mexicanos. (2015). *Combustóleo pesado*. México. Recuperado el 27 de Octubre del 2015, de <http://www.pemex.com/comercializacion/productos>

Pouliot, G., Wisner, E., Mobley, D., Hunt, W., (2012). *Quantification of emission factor uncertainty*. USA. Journal of the Air & Waste Management Association, 62:3, 287-298.

PRTR-España Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes (2007). *Óxido Nítrico*. España. Recuperado e 28 de Octubre del 2015, de <http://www.prtr-es.es/>

Radian Corporation, (1996). *Manuales del Programa de Inventarios de Emisiones de México. Volumen III-Técnicas Básicas de Estimación de Emisiones*. Sacramento, CA. Radian Corporation.

Rodríguez, M. Mance, H., (2009). *Cambio Climático: lo que está en juego*. Bogotá Colombia. Foro Nacional Ambiental.

Rojas .L, Garibay. V, (2007). *Partículas suspendidas, aeropartículas o aerosoles ¿hacen daño a la salud? ¿Qué hacer?* Instituto Nacional de Ecología. México. Recuperado el 16 de Octubre del 2015, de <http://www2.inecc.gob.mx>.

SECRE, Secretaria de Energía, Comisión Reguladora de Energía (2010). *Norma Oficial Mexicana NOM-001-SECRE-2010.Especificaciones del gas natural*. México

SEMARNAT, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (2001). *Guía para la correcta selección y empleo de métodos de estimación de emisiones contaminantes*. México. SEMARNAT, Comisión para la Cooperación Ambiental de América del Norte.

SEMARNAT, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (2008). *Inventario Nacional de Emisiones 2008*. México.

SEMARNAT, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (2011). *Norma Oficial Mexicana NOM-085-SEMARNAT-2011. Contaminación atmosférica – Niveles máximos permisibles de emisión de los equipos de combustión de calentamiento indirecto y su medición*. México.

SEMARNAT-INE, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología (2006). *Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 1990-2002*. México

SEMARNAT-SENER-SCFI, Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, Secretaría de Energía, Secretaría de Comercio y Fomento Industrial (2005). *Norma Oficial Mexicana. NOM-086-SEMARNAT-SENER-SCFI-2005. Especificaciones de los combustibles fósiles para la protección ambiental*. México.

SEMARNATH, Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales del Gobierno del Estado de Hidalgo (2001). *Ordenamiento Ecológico Territorial*. Estado de Hidalgo, México.

SEMARNATH, UAEH, Secretaria del Medio Ambiente y Recursos Naturales del Gobierno del Estado de Hidalgo, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (2013). *Programa Estatal de Acción ante el Cambio Climático de Hidalgo*. México.

SENER, Secretaría de Energía (2011). *Balance Nacional de Energía 2010*. México.

SENER, Secretaría de Energía (2014). *Prospectiva del sector eléctrico 2014-2028*. Secretaria de energía México.

SIE, Sistema de Información Energética. (2015) *Glosario de términos usados en el sector energético*. Recuperado el 23 de Octubre del 2015, de <http://sie.energia.gob.mx>

SSA, Secretaría de Salud. (1993). *Norma Oficial Mexicana NOM-021-SSA1-1993, Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al monóxido de carbono (CO). Valor permisible para la concentración de monóxido de carbono (CO) en el aire ambiente como medida de protección a la salud de la población*. México.

SSA, Secretaría de Salud. (1993). *Norma Oficial Mexicana NOM-026-SSA1-1993, Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al*

plomo (Pb). Valor normado para la concentración de plomo (Pb) en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población. México.

SSA, Secretaría de Salud. (1993). *Norma Oficial Mexicana NOM-023-SSA1-1993, Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente con respecto al bióxido de nitrógeno (NO₂). Valor normado para la concentración de bióxido de nitrógeno (NO₂) en el aire ambiente como medida de protección a la salud de la población. México.*

SSA, Secretaría de Salud. (2010). *Norma Oficial Mexicana NOM-022-SSA1-2010, Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al dióxido de azufre (SO₂). Valor normado para la concentración de dióxido de azufre (SO₂) en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población. México.*

SSA, Secretaría de Salud. (2014). *Norma Oficial Mexicana. NOM- 025-SSA1-2014. Salud ambiental. Valores límite permisibles para la concentración de partículas suspendidas PM₁₀ y PM_{2.5} en el aire ambiente y criterios para su evaluación. México*

Texas Department of State Health Services, (2012). *What you should know about molybdenum*, Austin Texas. Texas Department of State Health Services.

US-EPA, United States Environmental Protection Agency (1985). *Appendix A Miscellaneous Data & Conversion Factors. USA*. Recuperado el 20 de Mayo del 2015, de <http://www3.epa.gov>

US-EPA, United States Environmental Protection Agency. (1997). *Proteja su vida y la de su familia: Evite el envenenamiento con monóxido de Carbono*. USA. United States Environmental Protection Agency.

US-EPA, United States Environmental Protection Agency. (1998). *Volume I. Chapter 1: External Combustion Sources, Section 1.3 Fuel Oil Combustion AP 42*, Fifth Edition. USA. Recuperado el 5 de Mayo del 2015, de <http://www.epa.gov>

US-EPA, United States Environmental Protection Agency (1998). *Volume I. Chapter 1: External Combustion Sources, Section 1.4 Natural Gas Combustion AP 42, Fifth Edition*. Recuperado el 10 de Junio del 2015, de <http://www.epa.gov>

US-EPA, United States Environmental Protection Agency. (1999). *Óxidos de Nitrógeno (NOx), ¿Por Qué y Cómo Se Controlan?* Recuperado el 30 de Septiembre del 2015, de <http://www3.epa.gov>.

US-EPA, United States Environmental Protection Agency (2016). *Evaluación de Riesgo para contaminantes tóxicos del Aire: Guía de un ciudadano*. Recuperado el 7 de Febrero del 2016, de <http://www3.epa.gov>

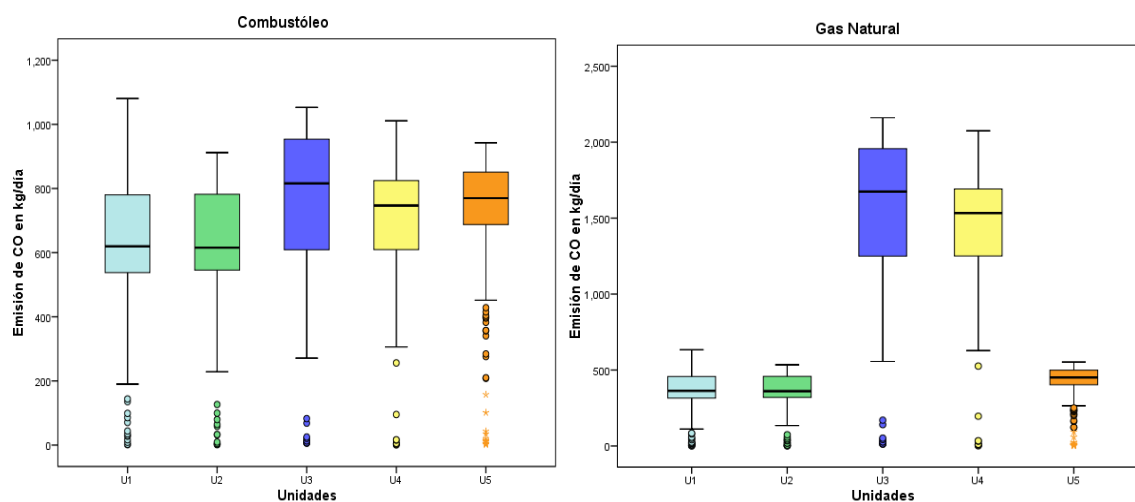
US-EPA, United States Environmental Protection Agency (2016) *.Terms & Acronyms*. Recuperado el 2 de Febrero del 2016, de <http://ofmpub.epa.gov>

Whitacre, M.D., (2015) *.Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*. Suiza. Vol. 234. Editorial Springer

Zuk M, Garibay. V, Iniestra, R. López T, Rojas L. Laguna, I. (2006). *Introducción a la evaluación de los impactos de las termoeléctricas de México*. México. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología.

ANEXO I Diagramas de Caja CONTAMINANTES CRITERIO

Monóxido de Carbono



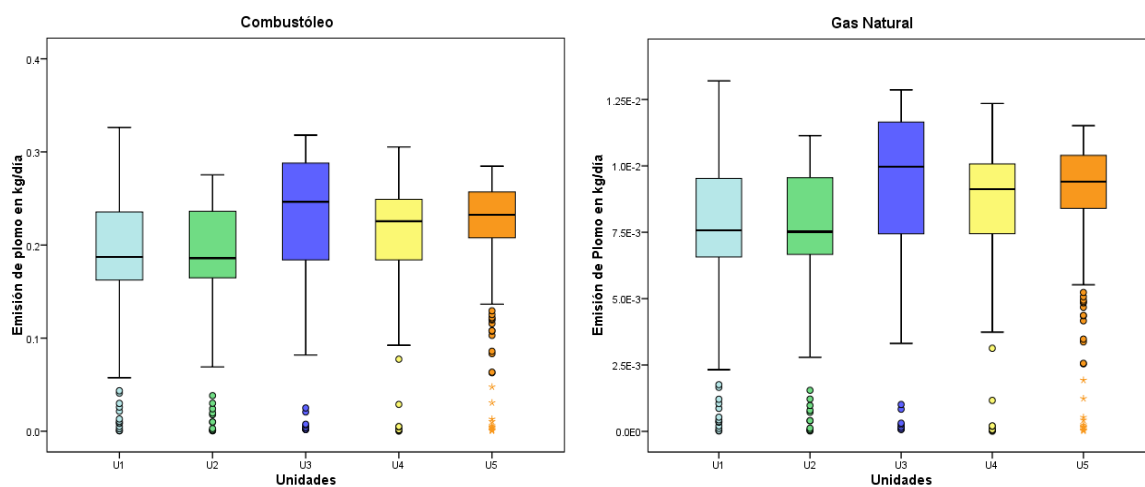
Estadísticos descriptivos Combustóleo (CO)

	N (Días en operación)	Kg/día							
		Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Incertidumbre	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
U1	287	1.20	1080.60	644.59	207.06	12.22	553.20	655.80	789.60
U2	290	1.20	936.60	644.62	190.94	11.21	553.65	637.50	795.60
U3	273	6.00	1053.00	754.22	219.45	13.28	615.30	809.40	911.70
U4	262	0.60	1011.00	700.42	190.47	11.76	613.35	750.30	825.30
U5	223	1.20	942.60	710.72	217.21	14.54	687.60	769.80	851.40

Estadísticos descriptivos Gas Natural (CO)

	N (Días en operación)	Kg/día							
		Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Incertidumbre	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
U1	287	0.70	633.60	377.95	121.41	7.17	324.36	384.52	462.97
U2	290	0.70	549.16	377.97	111.96	6.57	324.63	373.79	466.49
U3	273	12.31	2160.95	1547.80	450.36	27.26	1262.71	1661.04	1870.98
U4	262	1.23	2074.76	1437.40	390.88	24.15	1258.71	1539.75	1693.67
U5	223	0.70	552.68	416.72	127.36	8.53	403.17	451.36	499.21

Plomo



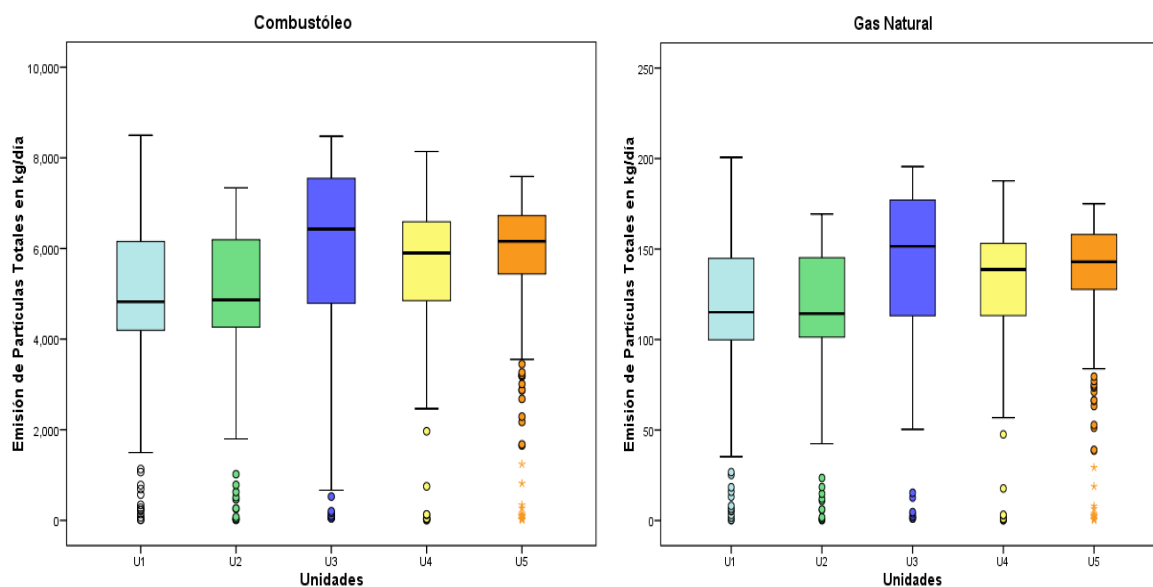
Estadísticos descriptivos Combustóleo (Pb)

	N (Días en operación)	Kg/día							
		Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Incertidumbre	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
U1	287	0.0004	0.3263	0.1946	0.0625	0.0037	0.1671	0.1981	0.2384
U2	290	0.0004	0.2829	0.1946	0.0576	0.0034	0.1672	0.1925	0.2403
U3	273	0.0018	0.3180	0.2277	0.0663	0.0040	0.1858	0.2444	0.2753
U4	262	0.0002	0.3053	0.2115	0.0575	0.0035	0.1852	0.2266	0.2492
U5	223	0.0004	0.2847	0.2146	0.0656	0.0044	0.2076	0.2324	0.2571

Estadísticos descriptivos Gas Natural (Pb)

	N(Días en operación)	Kg/día							
		Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Incertidumbre	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
U1	287	0.0000	0.0132	0.0079	0.0025	0.0001	0.0068	0.0090	0.0096
U2	290	0.0000	0.0114	0.0079	0.0023	0.0001	0.0068	0.0078	0.0097
U3	273	0.0001	0.0129	0.0092	0.0027	0.0002	0.0075	0.0099	0.0111
U4	262	0.0000	0.0124	0.0086	0.0023	0.0001	0.0075	0.0092	0.0101
U5	223	0.0000	0.0115	0.0087	0.0027	0.0002	0.0084	0.0094	0.0104

Partículas Totales



Estadísticos descriptivos Combustóleo (Partículas Totales)

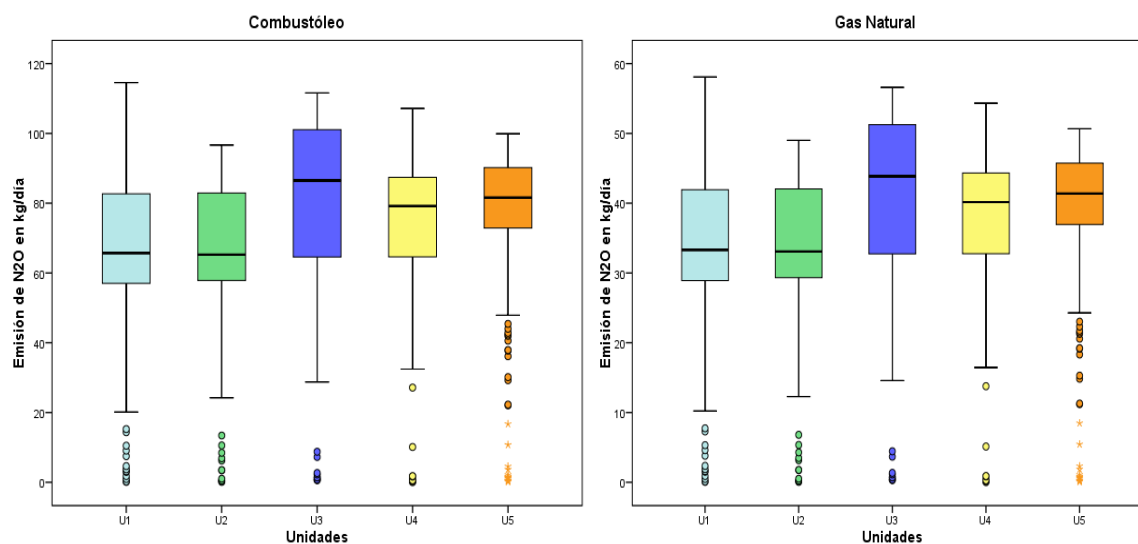
	N(Días en operación)	Kg/día							
		Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Incertidumbre	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
U1	287	9.66	8499.01	5101.54	1648.10	97.28	4358.69	5162.64	6309.36
U2	290	9.66	7366.43	5098.80	1517.24	89.09	4348.89	5103.62	6258.64
U3	273	47.19	8477.71	5980.46	1758.45	106.43	4848.82	6399.03	7218.58
U4	262	4.83	8139.56	5554.82	1523.86	94.14	4887.63	5950.72	6581.69
U5	223	9.66	7588.87	5629.82	1724.81	115.50	5436.34	6158.35	6724.64

Estadísticos descriptivos Gas Natural (Partículas Totales)

	N(Días en operación)	Kg/día							
		Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Incertidumbre	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
U1	287	0.223	200.64	119.68	38.45	2.269	102.71	121.76	146.61
U2	290	0.223	173.90	119.69	35.45	2.082	102.80	118.37	147.72
U3	273	1.114	195.51	140.04	40.75	2.466	114.25	150.28	169.28
U4	262	0.111	187.72	130.05	35.37	2.185	113.88	139.31	153.24
U5	223	0.223	175.02	131.96	40.33	2.701	127.67	142.93	158.08

GASES DE EFECTO INVERNADERO

Óxido Nitroso



Estadísticos descriptivos Combustóleo (N₂O)

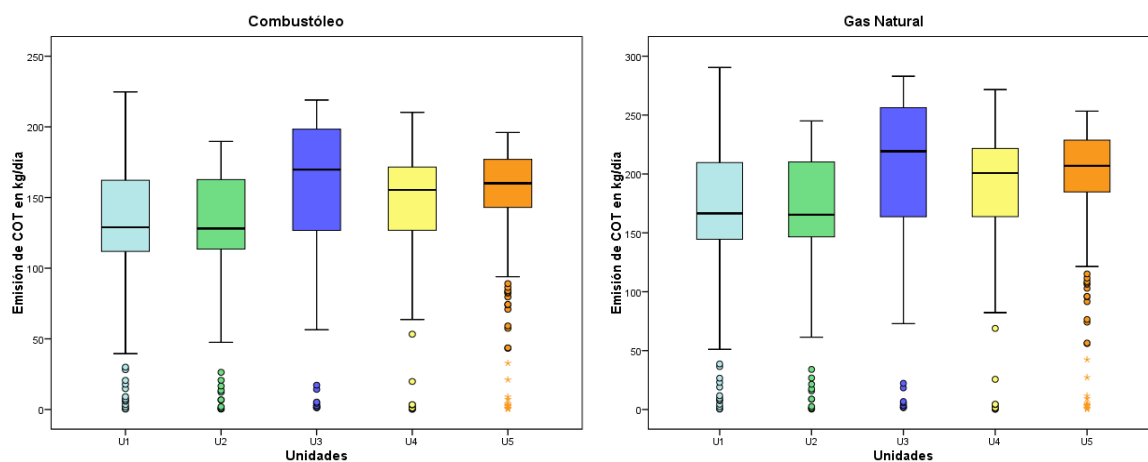
	N(Días en operación)	Kg/día							
		Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Incertidumbre	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
U1	287	0.127	114.544	68.326	21.948	1.29555	58.639	69.515	83.697
U2	290	0.127	99.279	68.330	20.239	1.18847	58.686	67.575	84.333
U3	273	0.636	111.618	79.947	23.262	1.40788	65.222	85.796	96.641
U4	262	0.064	107.166	74.245	20.189	1.24728	65.015	79.532	87.482
U5	223	0.127	99.916	75.336	23.024	1.54180	72.885	81.598	90.248

Estadísticos descriptivos Gas Natural (N₂O)

	N(Días en operación)	Kg/día							
		Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Incertidumbre	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
U1	287	0.065	58.080	34.645	11.129	0.657	29.733	35.248	42.439
U2	290	0.065	50.340	34.647	10.263	0.603	29.757	34.264	42.762
U3	273	0.322	56.596	40.538	11.795	0.714	33.071	43.503	49.002
U4	262	0.032	54.339	37.646	10.237	0.632	32.966	40.327	44.358
U5	223	0.065	50.663	38.199	11.675	0.782	36.957	41.375	45.761

CONTAMINANTES ORGÁNICOS

Compuestos orgánicos totales



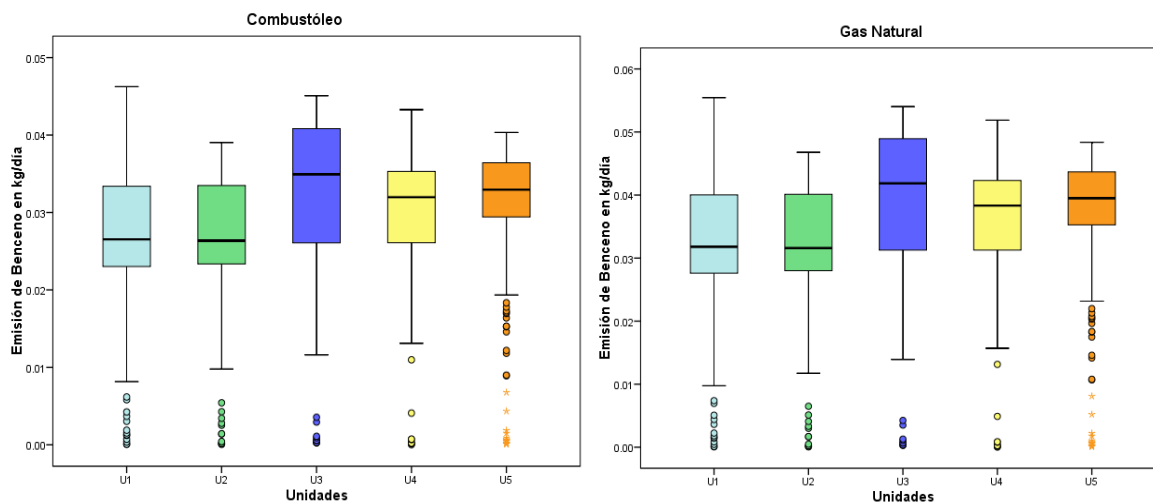
Estadísticos descriptivos Combustóleo (COT)

	N (Días en operación)	Kg/día							
		Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Incertidumbre	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
U1	287	0.249	224.765	134.075	43.068	2.542	115.065	136.406	164.236
U2	290	0.249	194.813	134.082	39.715	2.332	115.159	132.600	165.485
U3	273	1.248	219.024	156.878	45.646	2.763	127.982	168.355	189.633
U4	262	0.125	210.288	145.688	39.618	2.447	127.576	156.062	171.662
U5	223	0.249	196.061	147.829	45.179	3.025	143.021	160.118	177.091

Estadísticos descriptivos Gas Natural (COT)

	N(Días en operación)	Kg/día							
		Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Incertidumbre	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
U1	287	0.322	290.399	173.226	55.645	3.285	148.666	176.239	212.196
U2	290	0.322	251.700	173.365	51.354	3.016	148.989	171.401	213.808
U3	273	1.612	282.981	202.688	58.976	3.569	165.355	217.517	245.009
U4	262	0.161	217.694	188.231	51.187	3.162	164.831	201.634	221.790
U5	223	0.322	253.313	190.997	58.373	3.909	184.784	206.875	228.804

Benceno



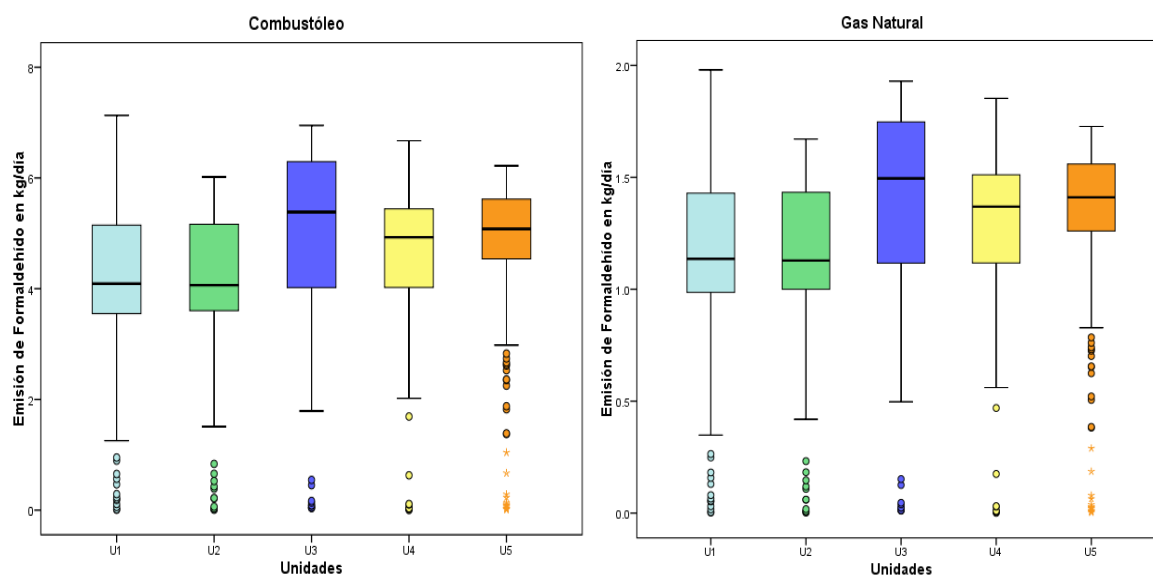
Estadísticos descriptivos Combustóleo (Benceno)

	N (Días en operación)	Kg/día							
		Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Incertidumbre	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
U1	287	0.0001	0.046	0.027	0.0088	0.00052	0.02367	0.02807	0.03379
U2	290	0.0001	0.041	0.027	0.0082	0.00048	0.02369	0.02728	0.03405
U3	273	0.0003	0.045	0.032	0.0094	0.00057	0.02633	0.03464	0.03902
U4	262	0.0000	0.043	0.029	0.0081	0.00050	0.02625	0.03211	0.03532
U5	223	0.0001	0.041	0.030	0.0093	0.00062	0.02943	0.03295	0.03644

Estadísticos descriptivos Gas Natural (Benceno)

	N(Días en operación)	Kg/día							
		Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Incertidumbre	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
U1	287	0.0001	0.0554	0.0331	0.0106	0.0006	0.0284	0.0336	0.0405
U2	290	0.0001	0.0481	0.0331	0.0098	0.0006	0.284	0.0327	0.0408
U3	273	0.0003	0.0540	0.0387	0.0113	0.0007	0.0316	0.0415	0.0468
U4	262	0.0000	0.0519	0.0359	0.0098	0.0006	0.0315	0.0385	0.0423
U5	223	0.0001	0.0484	0.0365	0.0111	0.0007	0.0353	0.0395	0.0437

Formaldehído



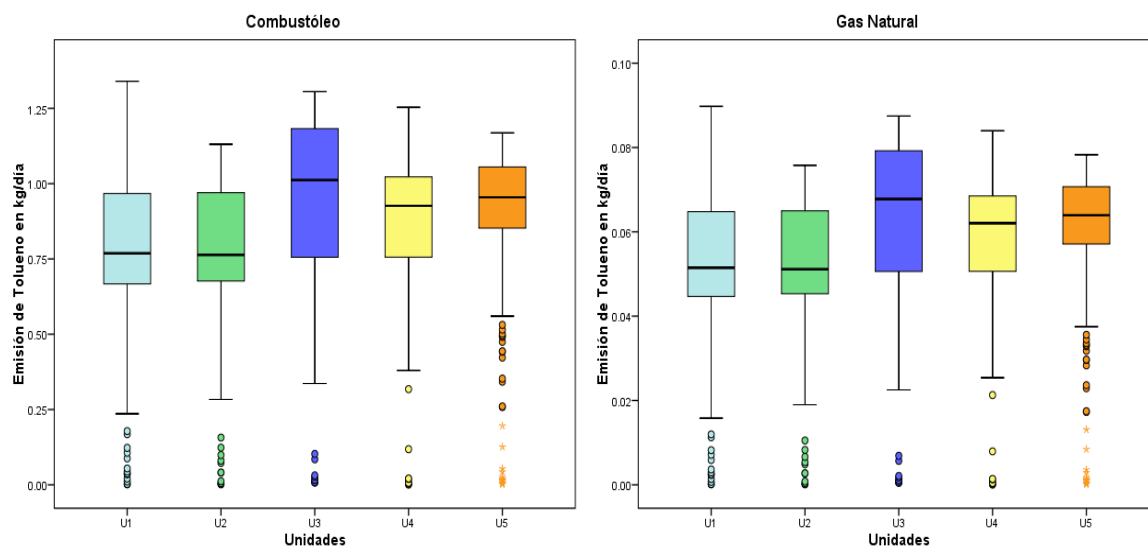
Estadísticos descriptivos Combustóleo (Formaldehído)

	N(Días en operación)	Kg/día							
		Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Incertidumbre	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
U1	287	0.0079	7.1320	4.2543	1.3666	0.0806	3.6511	4.3283	5.2114
U2	290	0.0079	6.1816	4.2545	1.2602	0.0740	3.6541	4.2075	5.2509
U3	273	0.0396	6.9498	4.9778	1.4484	0.0876	4.0609	5.3420	6.0172
U4	262	0.0040	6.6726	4.6228	1.2571	0.0776	4.0481	4.9519	5.4469
U5	223	0.0079	6.2212	4.6907	1.4336	0.0960	4.5382	5.0807	5.6192

Estadísticos descriptivos Gas Natural (Formaldehído)

	N(Días en operación)	Kg/día							
		Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Incertidumbre	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
U1	287	0.0022	1.9800	1.1811	0.3794	0.0224	1.0136	1.2016	1.4468
U2	290	0.0022	1.7161	1.1811	0.3499	0.0205	1.0145	1.1681	1.4578
U3	273	0.0110	1.9294	1.3820	0.4021	0.0243	1.1274	1.4831	1.6705
U4	262	0.0011	1.8525	1.2834	0.3490	0.0216	1.1238	1.3748	1.5122
U5	223	0.0022	1.7271	1.3023	0.398	0.0267	1.2599	1.4105	1.5600

Tolueno



Estadísticos descriptivos Combustóleo (Tolueno)

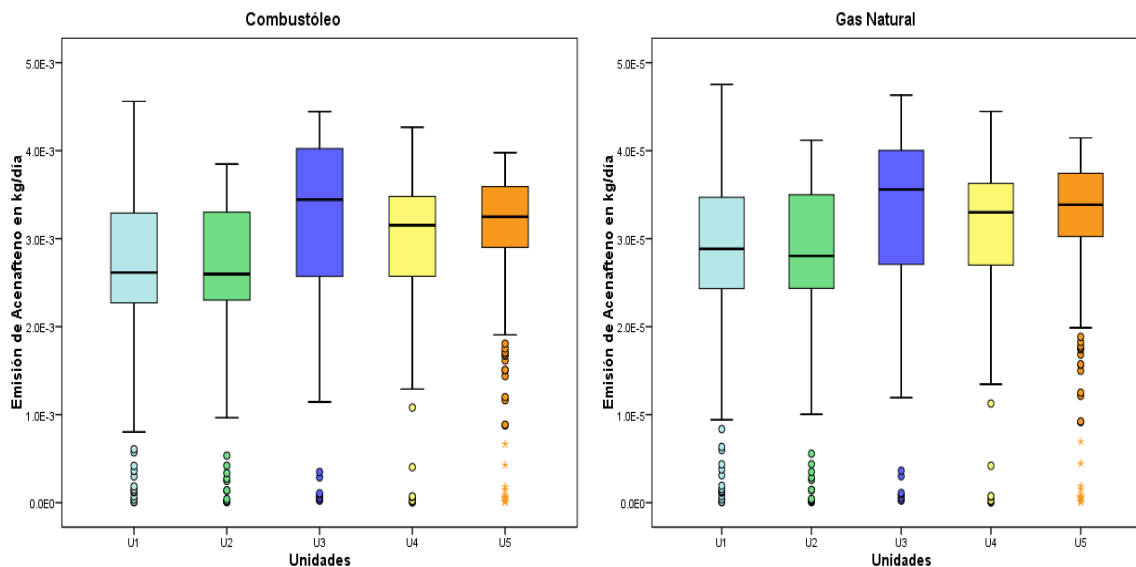
	N(Días en operación)	Kg/día							
		Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Incertidumbre	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
U1	287	0.0015	1.3399	0.7992	0.2567	0.0151	0.6859	0.8132	0.9791
U2	290	0.0015	1.1614	0.7993	0.2367	0.0139	0.6865	0.7905	0.9865
U3	273	0.0074	1.3057	0.9352	0.2721	0.0165	0.7629	1.0036	1.1305
U4	262	0.0007	1.2536	0.8685	0.2362	0.0146	0.7605	0.9304	1.0234
U5	223	0.0015	1.1688	0.8812	0.269	0.0180	0.8526	0.9545	1.0557

Estadísticos descriptivos Gas Natural (Tolueno)

	N(Días en operación)	Kg/día							
		Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Incertidumbre	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
U1	287	0.0001	0.0898	0.0535	0.0172	0.0010	0.0460	0.0545	0.0656
U2	290	0.0001	0.0778	0.0535	0.0159	0.0009	0.0460	0.0530	0.0661
U3	273	0.0005	0.0875	0.0626	0.0182	0.0011	0.0511	0.0672	0.0757
U4	262	0.0001	0.0840	0.0582	0.0158	0.0010	0.0509	0.0623	0.0686
U5	223	0.0001	0.0783	0.0590	0.0180	0.0012	0.0571	0.0639	0.0707

HIDROCARBUROS AROMATICOS POLICICLICOS

Acenafteno



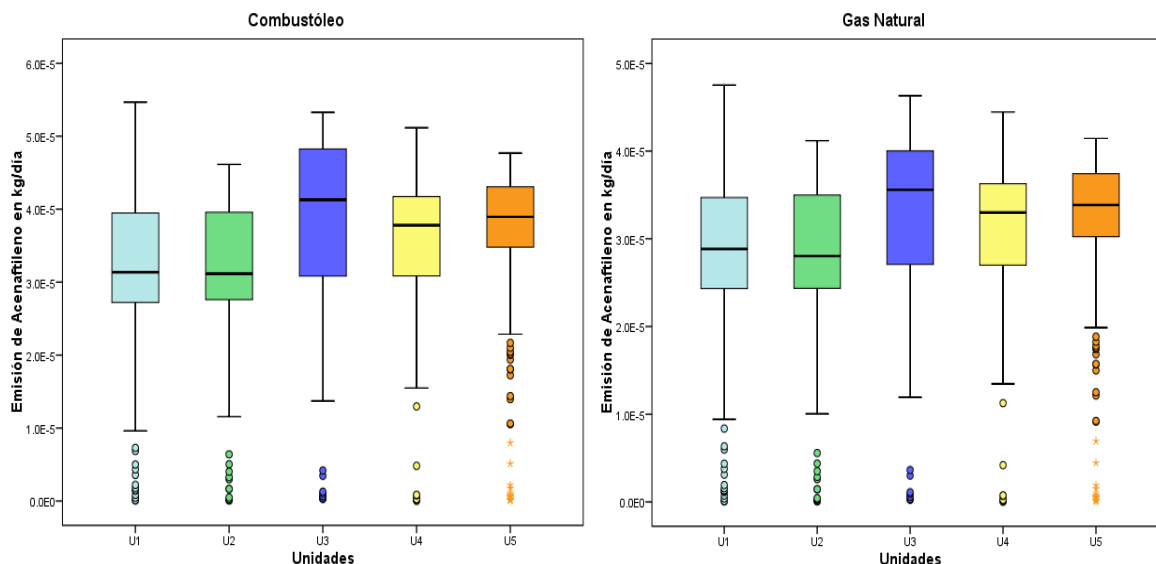
Estadísticos descriptivos Combustóleo (Acenafteno)

	N(Días en operación)	Kg/día							
		Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Incertidumbre	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
U1	287	0.0000	0.0046	0.0027	0.00087	5.13E-05	0.00233	0.00276	0.00333
U2	290	0.0000	0.0040	0.0027	0.00081	4.76E-05	0.00234	0.00269	0.00336
U3	273	0.0000	0.0044	0.0032	0.00093	5.63E-05	0.00259	0.00342	0.00385
U4	262	0.0000	0.0043	0.0029	0.00081	5.00E-05	0.00258	0.00316	0.00348
U5	223	0.0000	0.0040	0.0029	0.00092	6.16E-05	0.00290	0.00325	0.00359

Estadísticos descriptivos Gas Natural (Acenafteno)

	N(Días en operación)	Kg/día							
		Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Incertidumbre	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
U1	287	0.000	0.00005	0.000028	0.000009	5.38E-07	0.000024	0.000029	0.000035
U2	290	0.000	0.00004	0.000028	0.000008	4.93E-07	0.000024	0.000028	0.000035
U3	273	0.000	0.00005	0.000033	0.000010	5.84E-07	0.000027	0.000036	0.000040
U4	262	0.000	0.00004	0.000030	0.000008	5.18E-07	0.000027	0.000033	0.000036
U5	223	0.000	0.00004	0.000031	0.000010	6.40E-07	0.000030	0.000034	0.000037

Acenaftileno



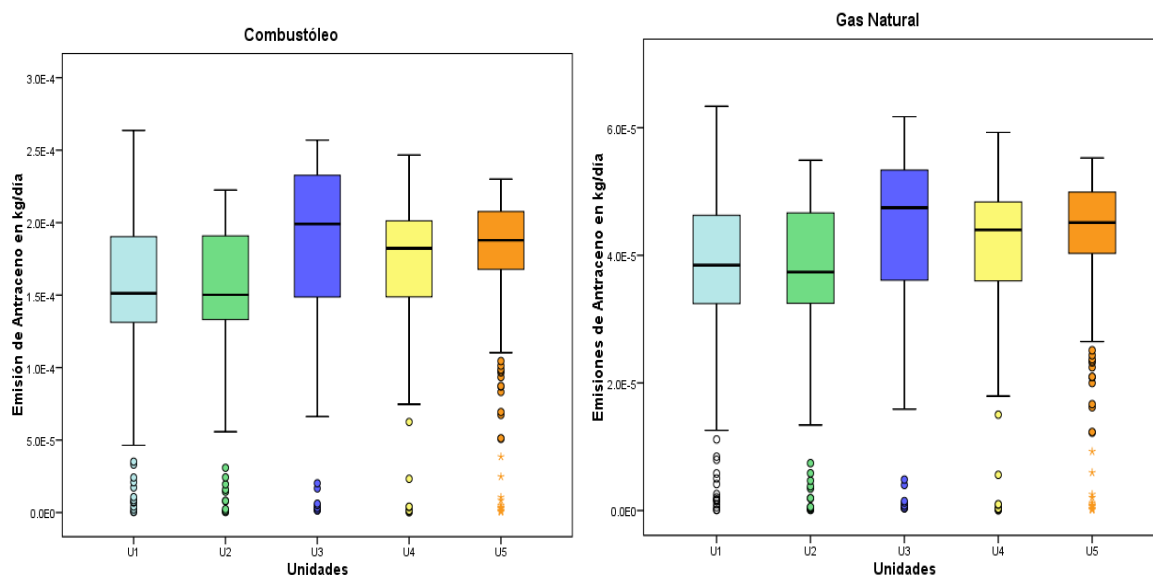
Estadísticos descriptivos Combustóleo (Acenaftileno)

	N(Días en operación)	Kg/día							
		Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Incertidumbre	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
U1	287	0.0000	0.0001	0.000033	0.0000105	6.1979E-07	0.000028	0.000033	0.000040
U2	290	0.0000	0.0000	0.000033	0.0000097	5.6961E-07	0.000028	0.000032	0.000040
U3	273	0.0000	0.0001	0.000038	0.0000111	6.7181E-07	0.000031	0.000041	0.000046
U4	262	0.0000	0.0001	0.000035	0.0000096	5.9309E-07	0.000031	0.000038	0.000042
U5	223	0.0000	0.0000	0.000036	0.0000110	7.3661E-07	0.000035	0.000039	0.000043

Estadísticos descriptivos Gas Natural (Acenaftileno)

	N(Días en operación)	Kg/día							
		Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Incertidumbre	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
U1	287	0.0000	0.00005	0.000028	0.000009	5.38E-07	0.000024	0.000029	0.000035
U2	290	0.0000	0.00004	0.000028	0.000008	4.93E-07	0.000024	0.000028	0.000035
U3	273	0.0000	0.00005	0.000033	0.000010	5.84E-07	0.000027	0.000036	0.000040
U4	262	0.0000	0.00004	0.000031	0.000008	5.18E-07	0.000027	0.000033	0.000036
U5	223	0.0000	0.00004	0.000031	0.000010	6.40E-07	0.000030	0.000034	0.000037

Antraceno



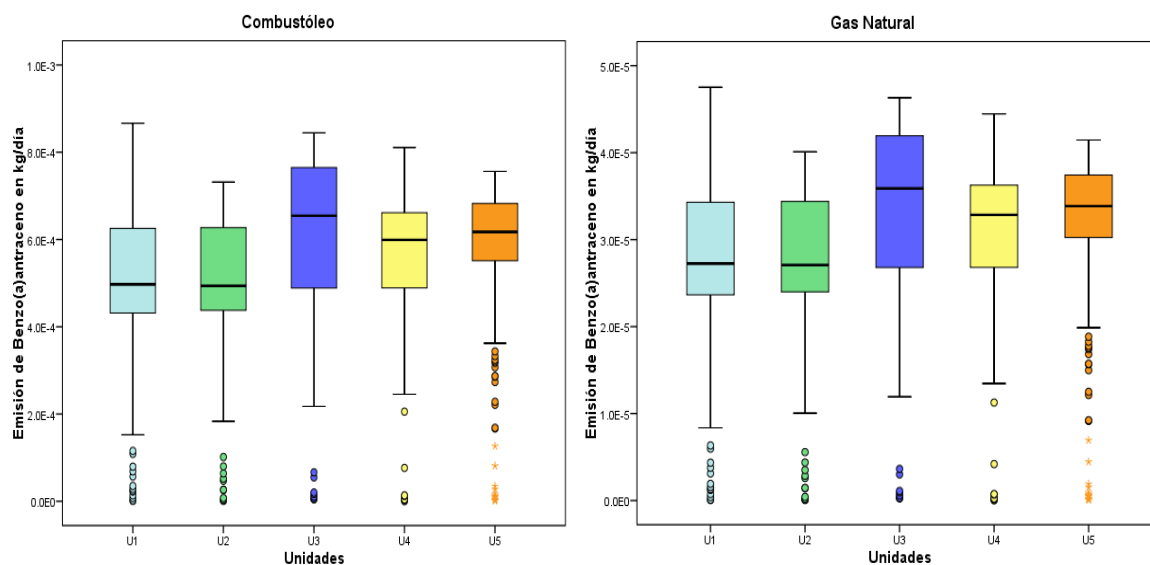
Estadísticos descriptivos Combustóleo (Antraceno)

	N(Días en operación)	Kg/día							
		Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Incertidumbre	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
U1	287	0.000	0.0003	0.000157	0.0000505	2.981E-06	0.000135	0.000160	0.000193
U2	290	0.000	0.0002	0.000157	0.0000466	2.736E-06	0.000135	0.000156	0.000194
U3	273	0.000	0.0003	0.000184	0.0000535	3.238E-06	0.000150	0.000197	0.000222
U4	262	0.000	0.0002	0.000171	0.0000465	2.873E-06	0.000150	0.000183	0.000201
U5	223	0.000	0.0002	0.000173	0.0000530	3.549E-06	0.000168	0.000188	0.000208

Estadísticos descriptivos Gas Natural (Antraceno)

	N(Días en operación)	Kg/día							
		Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Incertidumbre	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
U1	287	0.0000	0.00006	0.000038	0.000012	7.17E-07	0.000032	0.000039	0.000046
U2	290	0.0000	0.00005	0.000038	0.000011	6.58E-07	0.000033	0.000037	0.000047
U3	273	0.0000	0.00006	0.000044	0.000013	7.79E-07	0.000036	0.000048	0.000054
U4	262	0.0000	0.00006	0.000041	0.000011	6.90E-07	0.000036	0.000044	0.000048
U5	223	0.0000	0.00006	0.000042	0.000013	8.53E-07	0.000040	0.000045	0.000050

Benzo(a) antraceno



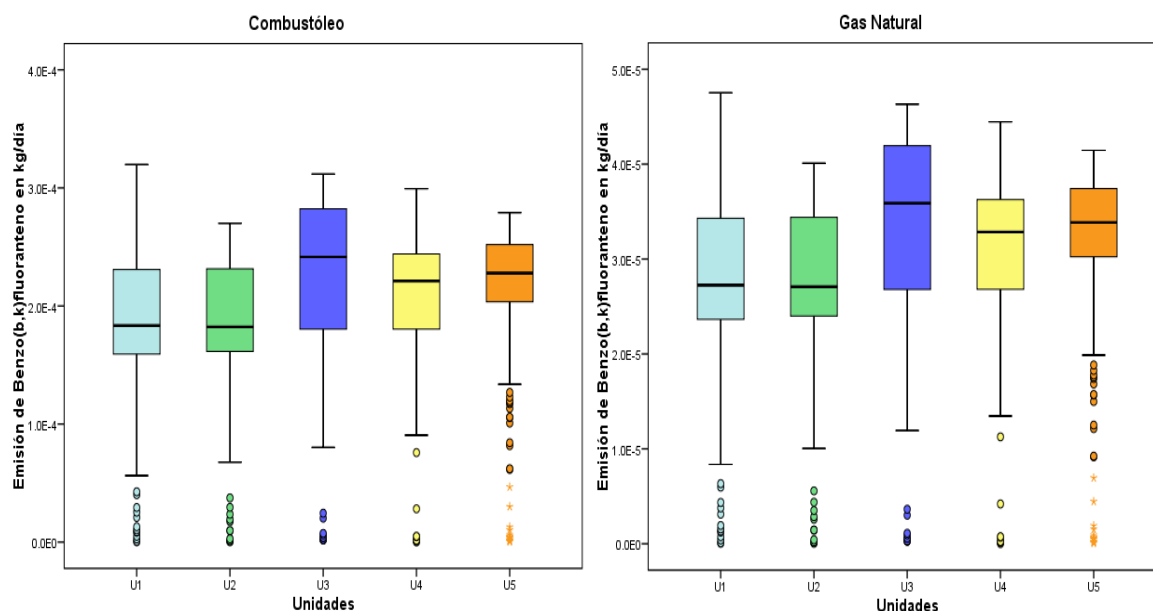
Estadísticos descriptivos Combustóleo (Benzo(a) antraceno)

	N(Días en operación)	Kg/día							
		Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Incertidumbre	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
U1	287	0.000	0.0009	0.000517	0.0001661	9.804E-06	0.000444	0.000526	0.000633
U2	290	0.000	0.0008	0.000517	0.0001531	8.990E-06	0.000444	0.000511	0.000638
U3	273	0.000	0.0008	0.000605	0.0001760	1.065E-05	0.000493	0.000649	0.000731
U4	262	0.000	0.0008	0.000562	0.0001528	9.440E-06	0.000492	0.000602	0.000662
U5	223	0.000	0.0008	0.000570	0.0001742	1.166E-05	0.000551	0.000617	0.000683

Estadísticos descriptivos Gas Natural (Benzo(a) antraceno)

	N(Días en operación)	Kg/día							
		Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Incertidumbre	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
U1	287	0.0000	0.00005	0.000028	0.000009	5.38E-07	0.000024	0.000029	0.000035
U2	290	0.0000	0.00004	0.000028	0.000008	4.93E-07	0.000024	0.000028	0.000035
U3	273	0.0000	0.00005	0.000033	0.000010	5.84E-07	0.000027	0.000036	0.000040
U4	262	0.0000	0.00004	0.000031	0.000008	5.18E-07	0.000027	0.000033	0.000036
U5	223	0.0000	0.00004	0.000031	0.000010	6.40E-07	0.000030	0.000034	0.000037

Benzo (b,k) fluoranteno



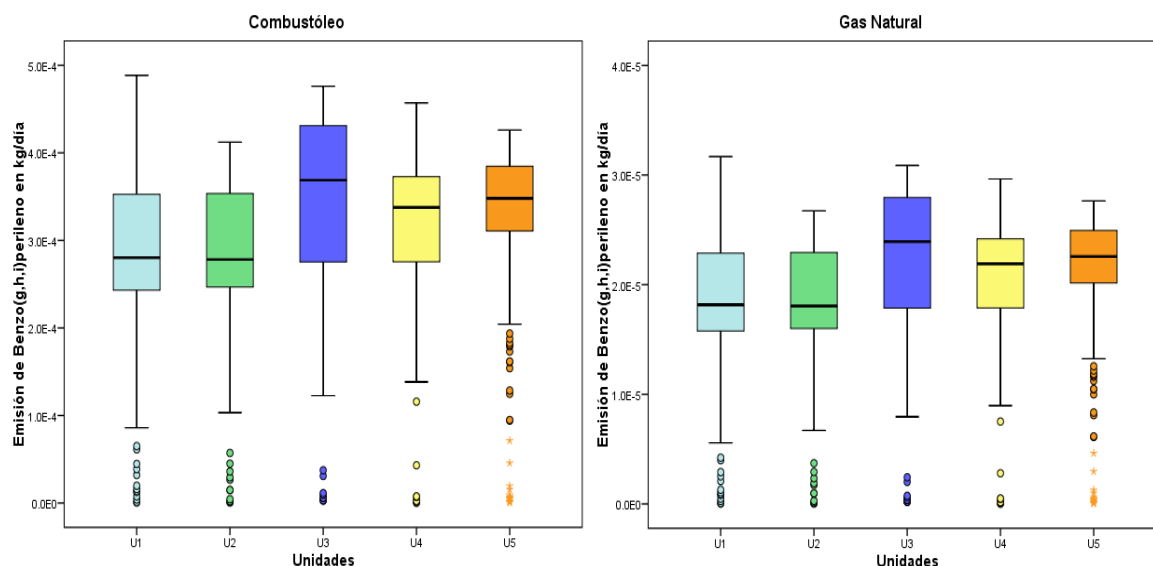
Estadísticos descriptivos Combustóleo (Benzo(b,k) fluoranteno)

	N(Días en operación)	Kg/día							
		Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Incertidumbre	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
U1	287	0.000	0.0003	0.000191	0.0000613	3.618E-06	0.000164	0.000194	0.000234
U2	290	0.000	0.0003	0.000191	0.0000565	3.318E-06	0.000164	0.000189	0.000235
U3	273	0.000	0.0003	0.000223	0.0000650	3.934E-06	0.000182	0.000240	0.000270
U4	262	0.000	0.0003	0.000207	0.0000564	3.484E-06	0.000182	0.000222	0.000244
U5	223	0.000	0.0003	0.000210	0.0000643	4.306E-06	0.000204	0.000228	0.000252

Estadísticos descriptivos Gas Natural (Benzo(b,k) fluoranteno)

	N(Días en operación)	Kg/día							
		Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Incertidumbre	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
U1	287	0.0000	0.00005	0.000028	0.0000091	5.37E-07	0.000024	0.000029	0.000035
U2	290	0.0000	0.00004	0.000028	0.0000084	4.93E-07	0.000024	0.000028	0.000035
U3	273	0.0000	0.00005	0.000033	0.0000096	5.84E-07	0.000027	0.000036	0.000040
U4	262	0.0000	0.00004	0.000031	0.0000084	5.17E-07	0.000027	0.000033	0.000036
U5	223	0.0000	0.00004	0.000031	0.0000095	6.39E-07	0.000030	0.000034	0.000037

Benzo (g, h, i) perileno



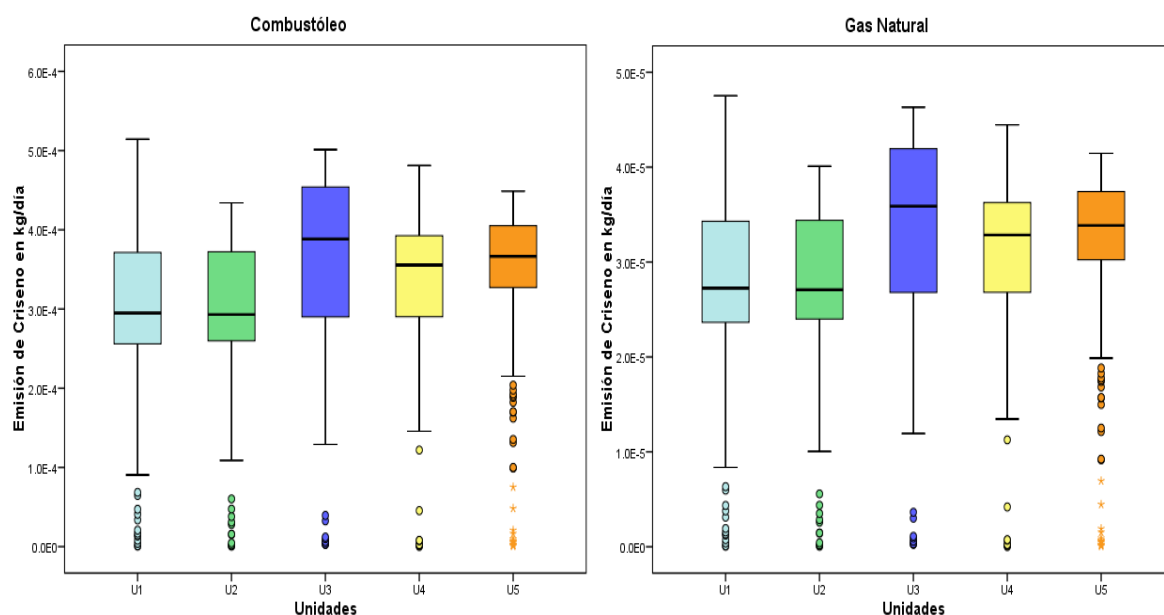
Estadísticos descriptivos Combustóleo (Benzo (g,h,i) perileno)

	N(Días en operación)	Kg/día							
		Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Incertidumbre	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
U1	287	0.000	0.0005	0.00029	0.0000936	5.525E-06	0.000250	0.000296	0.000357
U2	290	0.000	0.0004	0.00029	0.0000863	5.067E-06	0.000250	0.000288	0.000360
U3	273	0.000	0.0005	0.00034	0.0000992	6.004E-06	0.000278	0.000366	0.000412
U4	262	0.000	0.0005	0.00032	0.0000861	5.319E-06	0.000277	0.000339	0.000373
U5	223	0.000	0.0004	0.00032	0.0000982	6.576E-06	0.000311	0.000348	0.000385

Estadísticos descriptivos Gas Natural (Benzo (g,h,i) perileno)

	N(Días en operación)	Kg/día							
		Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Incertidumbre	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
U1	287	0.0000	0.00003	0.000019	0.000006	3.58E-07	0.000016	0.000019	0.000023
U2	290	0.0000	0.00003	0.000019	0.000006	3.29E-07	0.000016	0.000019	0.000023
U3	273	0.0000	0.00003	0.000022	0.000006	3.89E-07	0.000018	0.000024	0.000027
U4	262	0.0000	0.00003	0.000021	0.000006	3.45E-07	0.000018	0.000022	0.000024
U5	223	0.0000	0.00003	0.000021	0.000006	4.27E-07	0.000020	0.000023	0.000025

Criseno



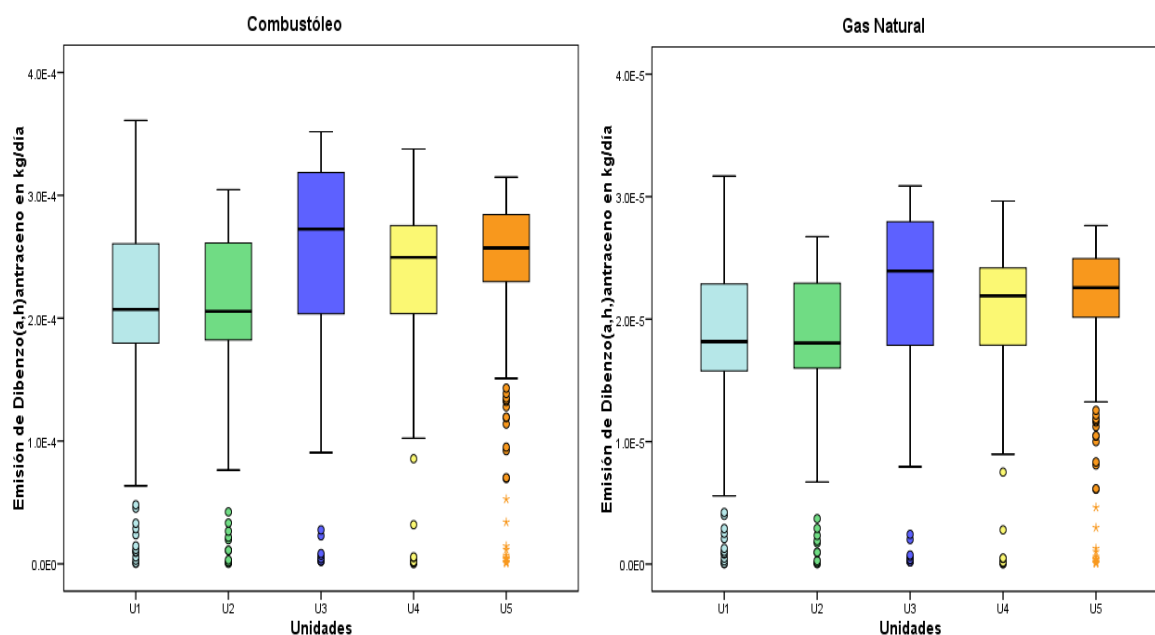
Estadísticos descriptivos Combustóleo (Criseno)

	N(Días en operación)	Kg/día							
		Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Incertidumbre	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
U1	287	0.000	0.0005	0.00031	0.000098	5.82E-06	0.00026	0.00031	0.00037
U2	290	0.000	0.0004	0.00031	0.000091	5.34E-06	0.00026	0.00030	0.00038
U3	273	0.000	0.0005	0.00036	0.000104	6.33E-06	0.00029	0.00038	0.00043
U4	262	0.000	0.0005	0.00033	0.000091	5.60E-06	0.00029	0.00036	0.00039
U5	223	0.000	0.0004	0.00034	0.000103	6.92E-06	0.00033	0.00036	0.00041

Estadísticos descriptivos Gas Natural (Criseno)

	N(Días en operación)	Kg/día							
		Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Incertidumbre	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
U1	287	0.000	0.00005	0.000028	0.000009	5.38E-07	0.000024	0.000029	0.000035
U2	290	0.000	0.00004	0.000028	0.000008	4.93E-07	0.000024	0.000028	0.000035
U3	273	0.000	0.00005	0.000033	0.000010	5.84E-07	0.000027	0.000036	0.000040
U4	262	0.000	0.00004	0.000031	0.000008	5.18E-07	0.000027	0.000033	0.000036
U5	223	0.000	0.00004	0.000031	0.000010	6.40E-07	0.000030	0.000034	0.000037

Dibenzo(a, h) antraceno



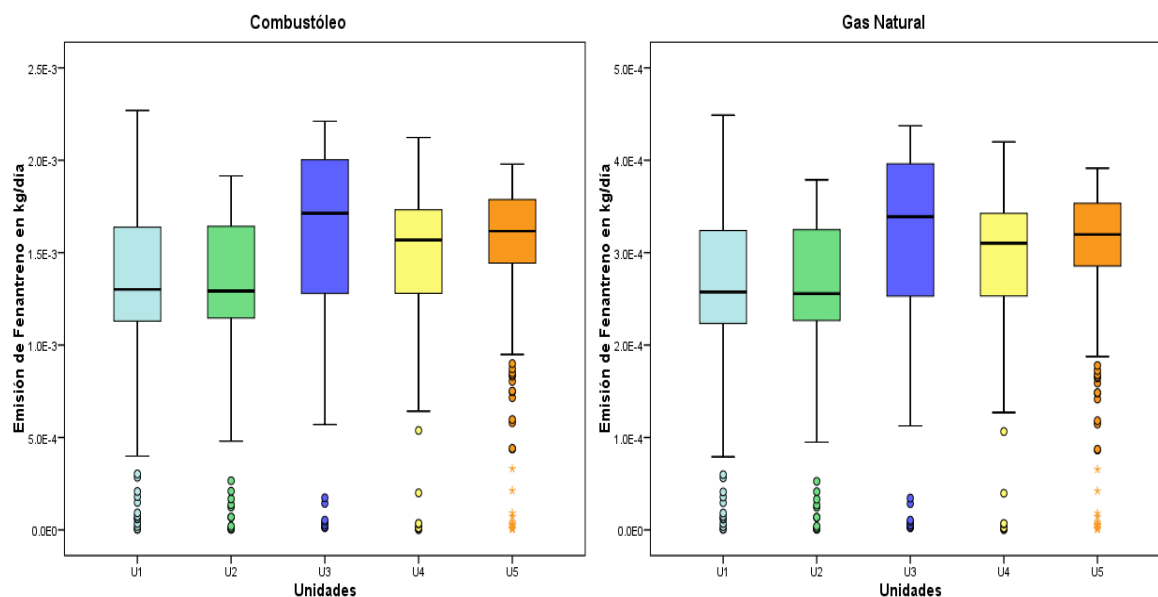
Estadísticos descriptivos Combustóleo (Dibenzo (a,h) antraceno)

	N(Días en operación)	Kg/día							
		Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Incertidumbre	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
U1	287	0.0000	0.0004	0.000215	0.0000692	4.08E-06	0.000185	0.000219	0.000264
U2	290	0.0000	0.0003	0.000215	0.0000638	3.75E-06	0.000185	0.000213	0.000266
U3	273	0.0000	0.0004	0.000252	0.0000733	4.44E-06	0.000206	0.000270	0.000305
U4	262	0.0000	0.0003	0.000234	0.0000636	3.93E-06	0.000205	0.000251	0.000276
U5	223	0.0000	0.0003	0.000237	0.0000725	4.85E-06	0.000230	0.000257	0.000284

Estadísticos descriptivos Gas Natural (Dibenzo (a,h) antraceno)

	N(Días en operación)	Kg/día							
		Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	incertidumbre	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
U1	287	0.0000	0.00003	0.000019	0.000006	3.58E-07	0.000016	0.000019	0.000023
U2	290	0.0000	0.00003	0.000019	0.000006	3.29E-07	0.000016	0.000019	0.000023
U3	273	0.0000	0.00003	0.000022	0.000006	3.89E-07	0.000018	0.000024	0.000027
U4	262	0.0000	0.00003	0.000021	0.000006	3.45E-07	0.000018	0.000022	0.000024
U5	223	0.0000	0.00003	0.000021	0.000006	4.27E-07	0.000020	0.000023	0.000025

Fenantreno



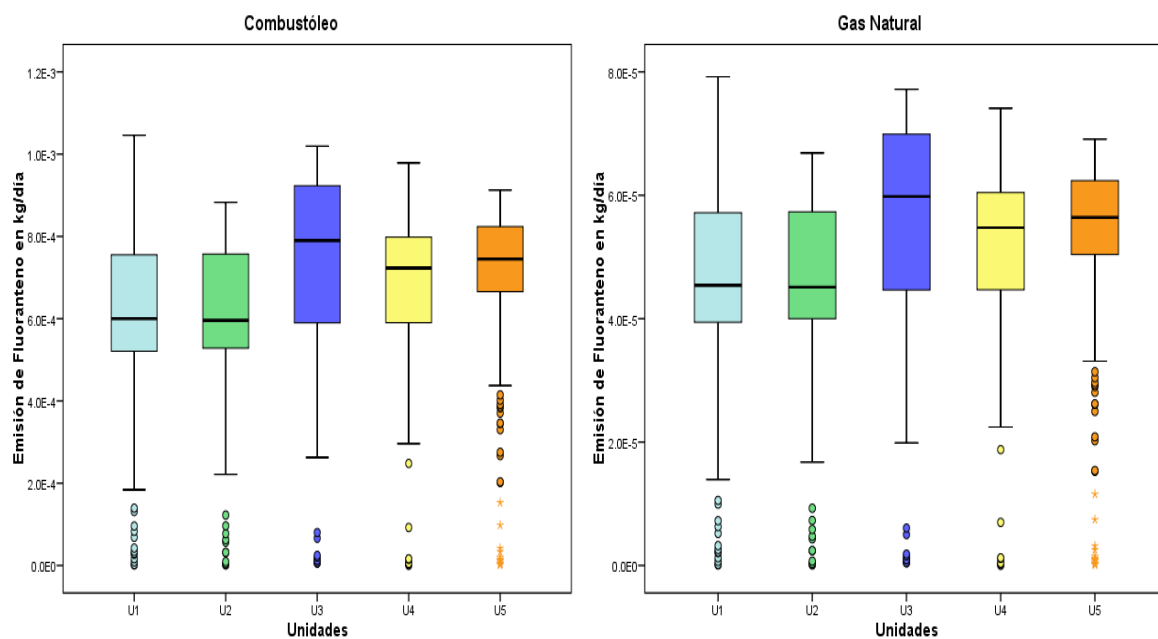
Estadísticos descriptivos Combustóleo (Fenantreno)

	N(Días en operación)	Kg/día							
		Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Incertidumbre	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
U1	287	0.0000	0.0023	0.001354	0.000435	2.56E-05	0.001162	0.001377	0.001658
U2	290	0.0000	0.0020	0.001354	0.000401	2.35E-05	0.001163	0.001339	0.001671
U3	273	0.0000	0.0022	0.001584	0.000461	2.79E-05	0.001292	0.001700	0.001915
U4	262	0.0000	0.0021	0.001471	0.000400	2.47E-05	0.001288	0.001576	0.001733
U5	223	0.0000	0.0020	0.001493	0.000456	3.05E-05	0.001444	0.001617	0.001788

Estadísticos descriptivos Gas Natural (Fenantreno)

	N (Días en operación)	Kg/día							
		Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Incertidumbre	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
U1	287	0.0000	0.00045	0.000268	0.000086	5.08E-06	0.000230	0.000272	0.000328
U2	290	0.0000	0.00039	0.000268	0.000079	4.66E-06	0.000230	0.000265	0.000330
U3	273	0.0000	0.00044	0.000313	0.000091	5.52E-06	0.000256	0.000336	0.000379
U4	262	0.0000	0.00042	0.000291	0.000079	4.89E-06	0.000255	0.000312	0.000343
U5	223	0.0000	0.00039	0.000295	0.00009	6.04E-06	0.000286	0.000320	0.000354

Fluoranteno



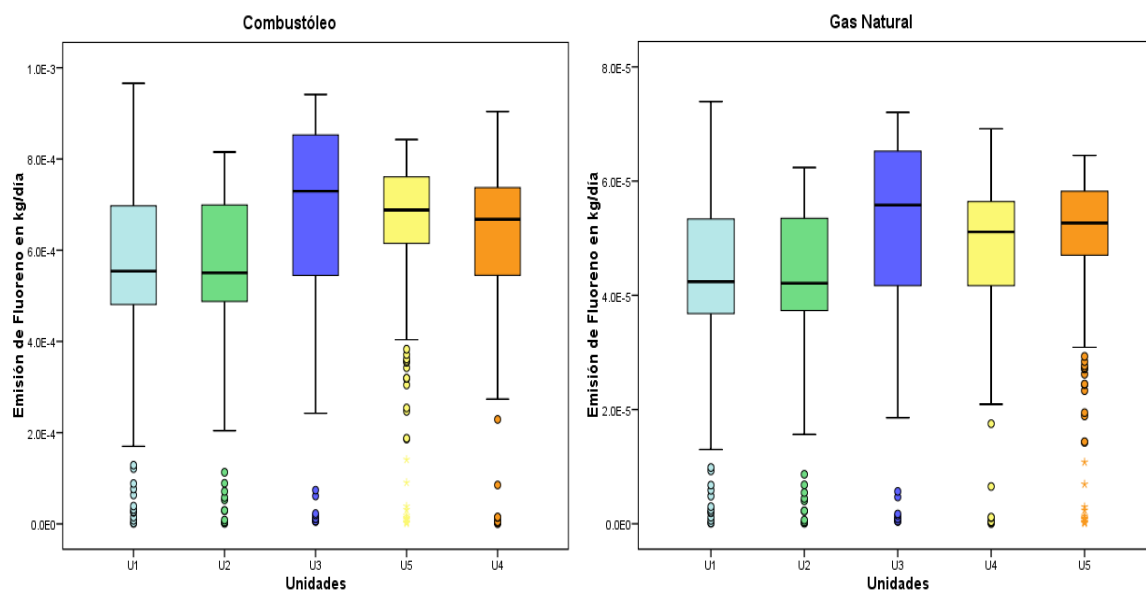
Estadísticos descriptivos Combustóleo (Fluoranteno)

	N(Días en operación)	Kg/día							
		Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Incertidumbre	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
U1	287	0.0000	0.0010	0.000624	0.0002004	1.18E-05	0.000535	0.000635	0.000764
U2	290	0.0000	0.0009	0.000624	0.0001848	1.08E-05	0.000536	0.000617	0.000770
U3	273	0.0000	0.0010	0.000730	0.0002124	1.28E-05	0.000596	0.000783	0.000883
U4	262	0.0000	0.0010	0.000678	0.0001844	1.14E-05	0.000594	0.000726	0.000799
U5	223	0.0000	0.0009	0.000688	0.0002103	1.41E-05	0.000666	0.000745	0.000824

Estadísticos descriptivos Gas Natural (Fluoranteno)

	N(Días en operación)	Kg/día							
		Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Incertidumbre	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
U1	287	0.0000	0.00008	0.000047	0.000015	8.96E-07	0.000041	0.000048	0.000058
U2	290	0.0000	0.00007	0.000047	0.000014	8.22E-07	0.000041	0.000047	0.000058
U3	273	0.0000	0.00008	0.000055	0.000016	9.73E-06	0.000045	0.000059	0.000067
U4	262	0.0000	0.00007	0.000051	0.000014	8.62E-06	0.000045	0.000055	0.000061
U5	223	0.0000	0.00007	0.000052	0.000016	1.07E-06	0.000050	0.000056	0.000062

Fluoreno



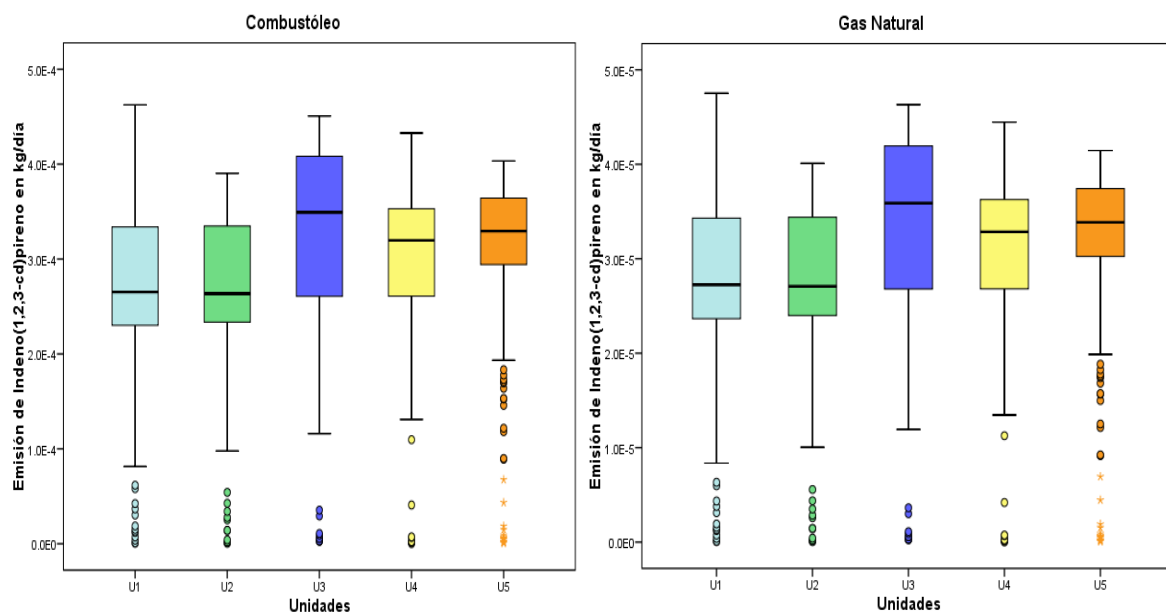
Estadísticos descriptivos Combustóleo (Fluoreno)

	N(Días en operación)	Kg/día							
		Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Incertidumbre	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
U1	287	0.0000	0.0010	0.000576	0.0001851	1.093E-05	0.000495	0.000586	0.000706
U2	290	0.0000	0.0008	0.000576	0.0001707	1.002E-05	0.000495	0.000570	0.000711
U3	273	0.0000	0.0009	0.000674	0.0001962	1.187E-05	0.000550	0.000724	0.000815
U4	262	0.0000	0.0009	0.000626	0.0001703	1.052E-05	0.000548	0.000671	0.000738
U5	223	0.0000	0.0008	0.000635	0.0001942	1.301E-05	0.000615	0.000688	0.000761

Estadísticos descriptivos Gas Natural (Fluoreno)

	N(Días en operación)	Kg/día							
		Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Incertidumbre	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
U1	287	0.0000	0.00007	0.000044	0.000014	8.36E-07	0.000038	0.000045	0.000054
U2	290	0.0000	0.00006	0.000044	0.000013	7.67E-07	0.000038	0.000044	0.000054
U3	273	0.0000	0.00007	0.000052	0.000015	9.09E-07	0.000042	0.000055	0.000062
U4	262	0.0000	0.00007	0.000048	0.000013	8.05E-07	0.000042	0.000051	0.000056
U5	223	0.0000	0.00006	0.000049	0.000015	9.95E-06	0.000047	0.000053	0.000058

Indeno (1,2, 3-cd) pireno



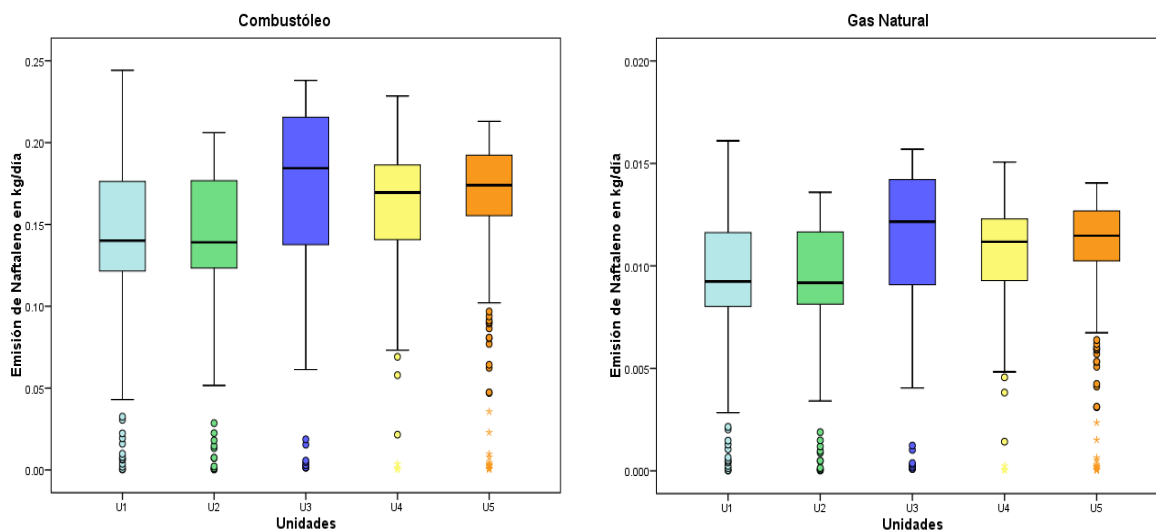
Estadísticos descriptivos Combustóleo (Indeno (1,2,3-cd)pireno)

	N(Días en operación)	Kg/día							
		Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Incertidumbre	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
U1	287	0.0000	0.0005	0.000276	0.0000886	5.229E-06	0.000237	0.000281	0.000338
U2	290	0.0000	0.0004	0.000276	0.0000817	4.797E-06	0.000237	0.000273	0.000341
U3	273	0.0000	0.0005	0.000323	0.0000939	5.683E-06	0.000263	0.000346	0.000390
U4	262	0.0000	0.0004	0.000300	0.0000815	5.035E-06	0.000263	0.000321	0.000353
U5	223	0.0000	0.0004	0.000304	0.0000930	5.227E-06	0.000294	0.000329	0.000364

Estadísticos descriptivos Gas Natural (Indeno (1,2,3-cd)pireno)

	N(Días en operación)	Kg/día							
		Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Incertidumbre	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
U1	287	0.0000	0.00005	0.000028	0.000009	5.38E-07	0.000024	0.000029	0.000035
U2	290	0.0000	0.00004	0.000028	0.000008	4.93E-07	0.000024	0.000028	0.000035
U3	273	0.0000	0.00005	0.000033	0.000010	5.84E-07	0.000027	0.000036	0.000040
U4	262	0.0000	0.00004	0.000031	0.000008	5.18E-07	0.000027	0.000033	0.000036
U5	223	0.0000	0.00004	0.000031	0.000010	6.40E-07	0.000030	0.000034	0.000037

Naftaleno



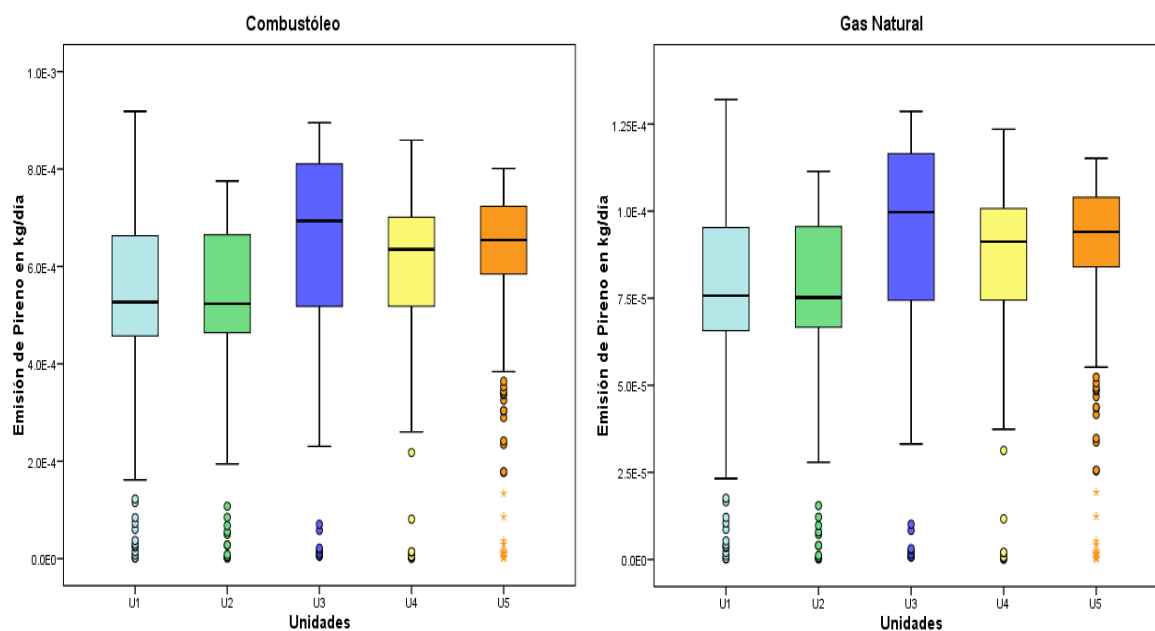
Estadísticos descriptivos Combustóleo (Naftaleno)

	N (Días en operación)	Kg/día							
		Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Incertidumbre	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
U1	287	0.0003	0.2442	0.1456	0.0468	0.0027	0.1250	0.1482	0.1784
U2	290	0.0003	0.2117	0.1456	0.0431	0.0025	0.1251	0.1441	0.1798
U3	273	0.0014	0.2380	0.1704	0.0496	0.0030	0.1391	0.1829	0.2060
U4	262	0.0001	0.2285	0.1583	0.0431	0.0026	0.1386	0.1695	0.1865
U5	223	0.0003	0.2130	0.1606	0.0491	0.0033	0.1554	0.1739	0.1924

Estadísticos descriptivos Gas Natural (Naftaleno)

	N (Días en operación)	Kg/día							
		Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Incertidumbre	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
U1	287	0.0000	0.0161	0.0096	0.0031	0.00018	0.0082	0.0098	0.0118
U2	290	0.0000	0.0140	0.0096	0.0028	0.00017	0.0083	0.0095	0.0119
U3	273	0.0001	0.0157	0.0112	0.0033	0.00020	0.0092	0.0121	0.0136
U4	262	0.0000	0.0151	0.0105	0.0028	0.00017	0.0093	0.0112	0.0123
U5	223	0.0000	0.0141	0.0106	0.0032	0.00022	0.0102	0.0115	0.0127

Pireno



Estadísticos descriptivos Combustóleo (Pireno)

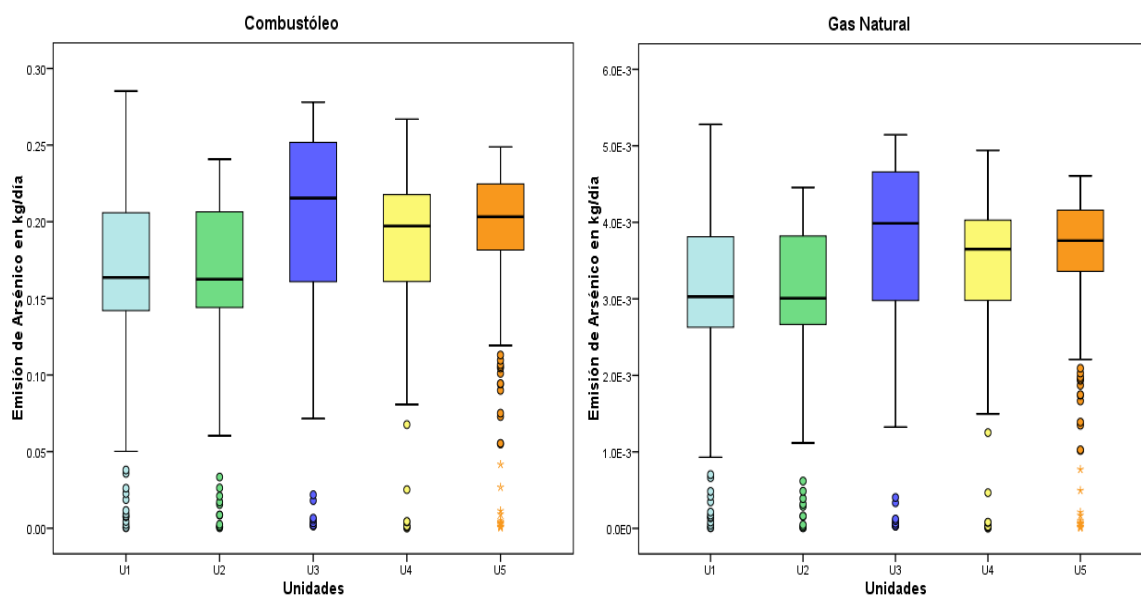
	N(Días en operación)	Kg/día							
		Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Incertidumbre	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
U1	287	0.0000	0.0009	0.000548	0.0001760	1.0389E-05	0.000470	0.000557	0.000671
U2	290	0.0000	0.0008	0.000548	0.0001623	9.5306E-06	0.000471	0.000542	0.000676
U3	273	0.0000	0.0009	0.000641	0.0001865	1.1287E-05	0.000523	0.000688	0.000775
U4	262	0.0000	0.0009	0.000595	0.0001619	1.0002E-05	0.000521	0.000638	0.000702
U5	223	0.0000	0.0008	0.000604	0.0001846	1.2362E-05	0.000584	0.000654	0.000724

Estadísticos descriptivos Gas Natural (Pireno)

	N(Días en operación)	Kg/día							
		Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Incertidumbre	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
U1	287	0.0000	0.00013	0.000079	0.000025	1.49E-06	0.000068	0.000080	0.000097
U2	290	0.0000	0.00011	0.000079	0.000023	1.37E-06	0.000068	0.000078	0.000097
U3	273	0.0000	0.00013	0.000092	0.000027	1.62E-06	0.000075	0.000099	0.000111
U4	262	0.0000	0.00012	0.000086	0.000023	1.44E-06	0.000075	0.000092	0.000101
U5	223	0.0000	0.00012	0.000087	0.000027	1.78E-06	0.000084	0.000094	0.000104

CONTAMINANTES TÓXICOS INORGÁNICOS

Arsénico



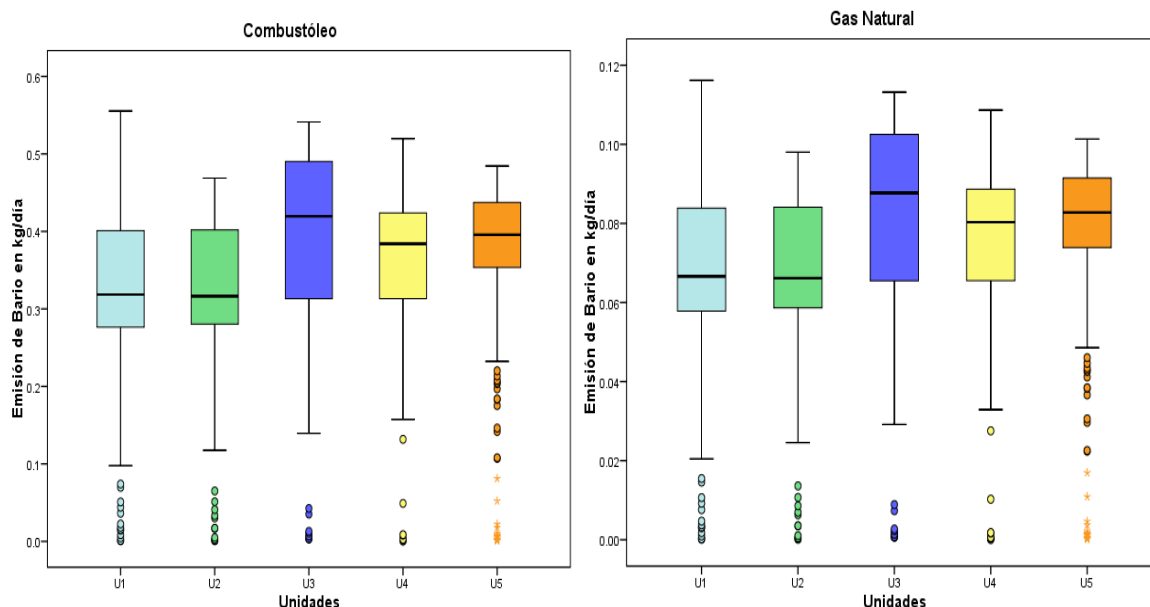
Estadísticos descriptivos Combustóleo (Arsénico)

	N(Días en operación)	Kg/día							
		Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Incertidumbre	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
U1	287	0.0003	0.2853	0.170172	0.0546642	0.003226	0.146045	0.173131	0.208454
U2	290	0.0003	0.2473	0.170181	0.0504082	0.002960	0.146164	0.168300	0.210038
U3	273	0.0016	0.2780	0.199115	0.0579363	0.003506	0.162439	0.213682	0.240689
U4	262	0.0002	0.2669	0.184912	0.0502844	0.003106	0.161924	0.198079	0.217879
U5	223	0.0003	0.2488	0.187629	0.0573438	0.003840	0.181526	0.203227	0.224770

Estadísticos descriptivos Gas Natural (Arsénico)

	N(Días en operación)	Kg/día							
		Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Incertidumbre	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
U1	287	0.00001	0.0053	0.00315	0.00101	5.97E-05	0.00270	0.00320	0.00386
U2	290	0.00001	0.0046	0.00315	0.00093	5.48E-05	0.00271	0.00311	0.00389
U3	273	0.00003	0.0052	0.00369	0.00107	6.49E-05	0.00301	0.00395	0.00445
U4	262	0.0000	0.0049	0.00342	0.00093	5.75E-05	0.00300	0.00367	0.00403
U5	223	0.00001	0.0046	0.00347	0.00106	7.11E-05	0.00336	0.00376	0.00416

Bario



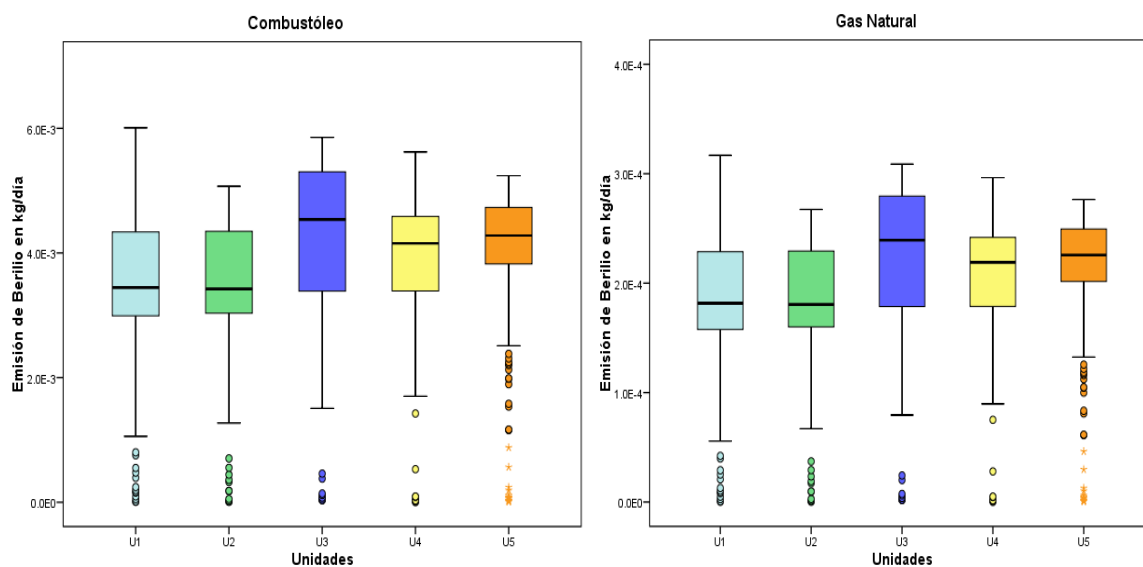
Estadísticos descriptivos Combustóleo (Bario)

	N(Días en operación)	Kg/día							
		Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Incertidumbre	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
U1	287	0.0006	0.5554	0.3313	0.10643	0.00628	0.28434	0.33708	0.40585
U2	290	0.0006	0.4814	0.3313	0.09814	0.00576	0.28457	0.32767	0.40894
U3	273	0.0031	0.5412	0.3876	0.11280	0.00683	0.31626	0.41603	0.46861
U4	262	0.0003	0.5197	0.3600	0.09790	0.00605	0.31526	0.38565	0.42420
U5	223	0.0006	0.4845	0.3653	0.11165	0.00747	0.35343	0.39567	0.43762

Estadísticos descriptivos Gas Natural (Bario)

	N(Días en operación)	Kg/día							
		Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Incertidumbre	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
U1	287	0.00013	0.11616	0.06929	0.02226	0.00131	0.05947	0.07050	0.08488
U2	290	0.00013	0.10068	0.06929	0.02053	0.00121	0.05951	0.06853	0.08552
U3	273	0.00064	0.11319	0.08108	0.02359	0.00143	0.06614	0.08701	0.09800
U4	262	0.00006	0.10868	0.07529	0.02047	0.00126	0.06593	0.08065	0.08872
U5	223	0.00013	0.10133	0.07640	0.02335	0.00156	0.07391	0.08275	0.09152

Berilio



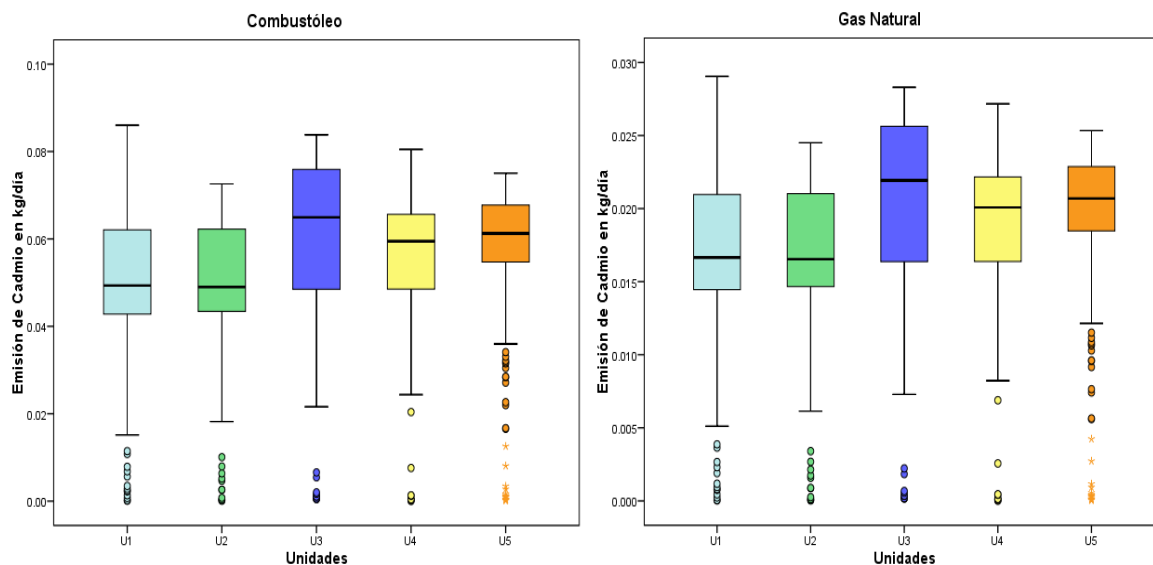
Estadísticos descriptivos Combustóleo (Berilio)

	N(Días en operación)	Kg/día							
		Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Incertidumbre	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
U1	287	0.0000	0.0060	0.003584	0.0011513	6.7959E-05	0.003076	0.003646	0.004390
U2	290	0.0000	0.0052	0.003584	0.0010616	6.2339E-05	0.003078	0.003545	0.004424
U3	273	0.0000	0.0059	0.004193	0.0012202	7.3849E-05	0.003421	0.004500	0.005069
U4	262	0.0000	0.0056	0.003894	0.0010590	6.5425E-05	0.003410	0.004172	0.004589
U5	223	0.0000	0.0052	0.003952	0.0012077	8.0874E-05	0.003823	0.004280	0.004734

Estadísticos descriptivos Gas Natural (Berilio)

	N(Días en operación)	Kg/día							
		Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Incertidumbre	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
U1	287	0.0000	0.00032	0.000189	0.000061	3.58E-06	0.000162	0.000192	0.000232
U2	290	0.0000	0.00027	0.000189	0.000056	3.29E-06	0.000162	0.000187	0.000233
U3	273	0.0000	0.00031	0.000221	0.000064	3.89E-06	0.000180	0.000237	0.000267
U4	262	0.0000	0.00030	0.000205	0.000056	3.45E-06	0.000180	0.000220	0.000242
U5	223	0.0000	0.00028	0.000208	0.000064	4.26E-06	0.000202	0.000226	0.000250

Cadmio



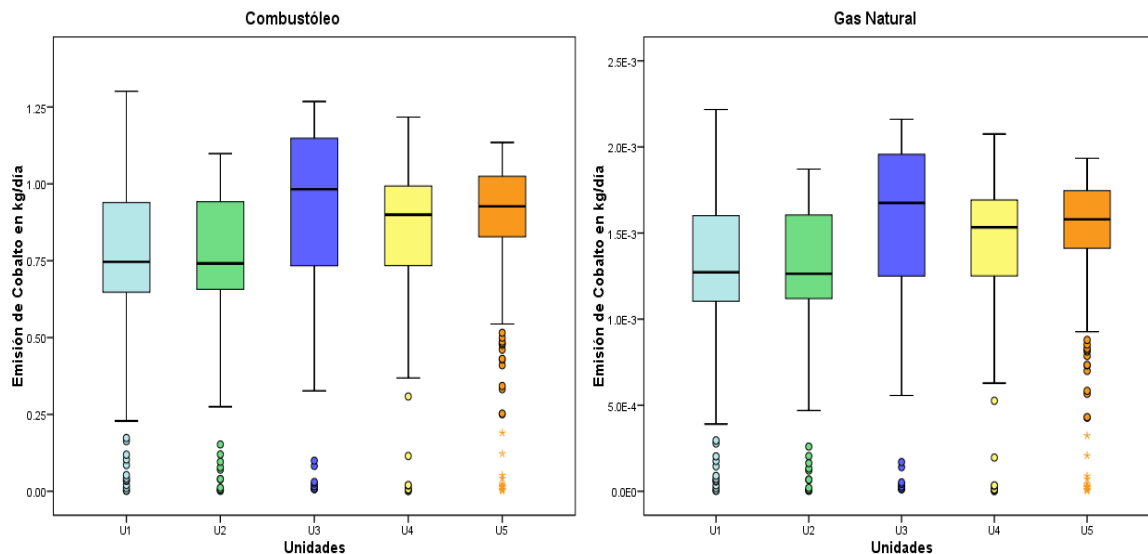
Estadísticos descriptivos Combustóleo (Cadmio)

	N(Días en operación)	Kg/día							
		Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Incertidumbre	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
U1	287	0.0001	0.0860	0.051309	0.0164821	0.000973	0.044035	0.052202	0.062852
U2	290	0.0001	0.0746	0.051312	0.0151988	0.000893	0.044071	0.050745	0.063330
U3	273	0.0005	0.0838	0.060036	0.0174687	0.001057	0.048978	0.064428	0.072571
U4	262	0.0000	0.0805	0.055754	0.0151615	0.000936	0.048823	0.059724	0.065694
U5	223	0.0001	0.0750	0.056573	0.0172900	0.001157	0.054733	0.061276	0.067771

Estadísticos descriptivos Gas Natural (Cadmio)

	N(Días en operación)	Kg/día							
		Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Incertidumbre	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
U1	287	0.00003	0.02404	0.017323	0.005565	0.000328	0.01487	0.01762	0.02122
U2	290	0.00003	0.02517	0.017324	0.005131	0.000301	0.01488	0.01713	0.02138
U3	273	0.00016	0.02830	0.020269	0.005898	0.000357	0.01654	0.02175	0.02450
U4	262	0.00002	0.02717	0.018823	0.005119	0.000316	0.01648	0.02016	0.02218
U5	223	0.00003	0.02533	0.019100	0.005837	0.000391	0.01848	0.02069	0.02288

Cobalto



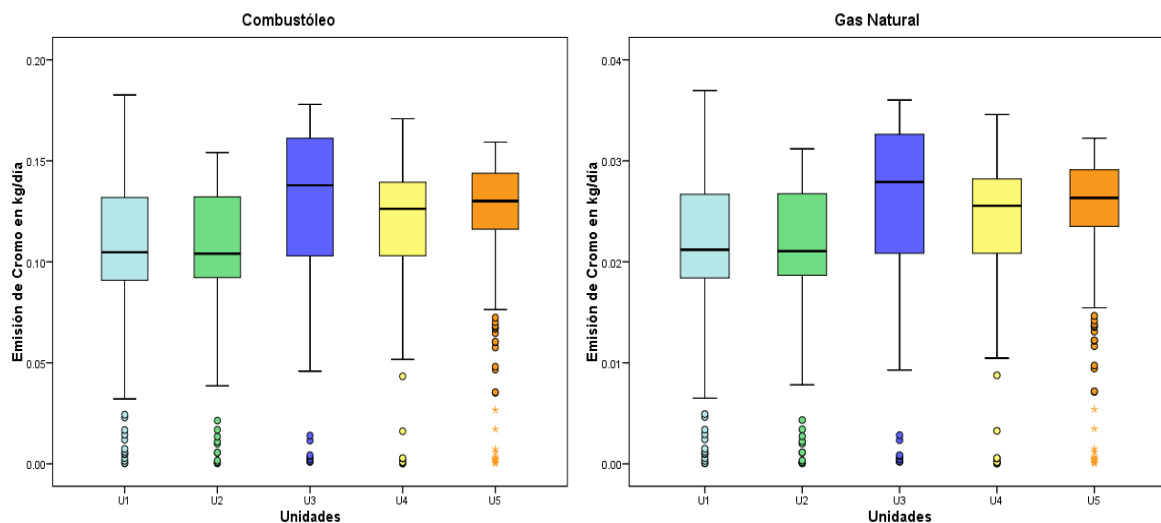
Estadísticos descriptivos Combustóleo (Cobalto)

	N(Días en operación)	Kg/día							
		Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Incertidumbre	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
U1	287	0.0014	1.3010	0.776087	0.2493017	0.014716	0.666053	0.789583	0.950678
U2	290	0.0014	1.1277	0.776127	0.2298917	0.013499	0.666595	0.767550	0.957902
U3	273	0.0072	1.2678	0.908083	0.2642246	0.015992	0.740821	0.974518	1.097687
U4	262	0.0007	1.2172	0.843311	0.2293275	0.014168	0.738473	0.903361	0.993661
U5	223	0.0014	1.1349	0.855704	0.2615225	0.017513	0.827870	0.926839	1.025086

Estadísticos descriptivos Gas Natural (Cobalto)

	N (Días en operación)	Kg/día							
		Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Incertidumbre	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
U1	287	0.00000	0.00222	0.001323	0.000425	2.51E-05	0.001135	0.001346	0.001620
U2	290	0.00000	0.00192	0.001323	0.000392	2.30E-05	0.001136	0.001308	0.001633
U3	273	0.00001	0.00216	0.001548	0.000450	2.73E-05	0.001263	0.001661	0.001871
U4	262	0.00000	0.00207	0.001437	0.000391	2.41E-05	0.001259	0.001540	0.001694
U5	223	0.00000	0.00193	0.001459	0.000446	2.99E-05	0.001411	0.001580	0.001747

Cromo



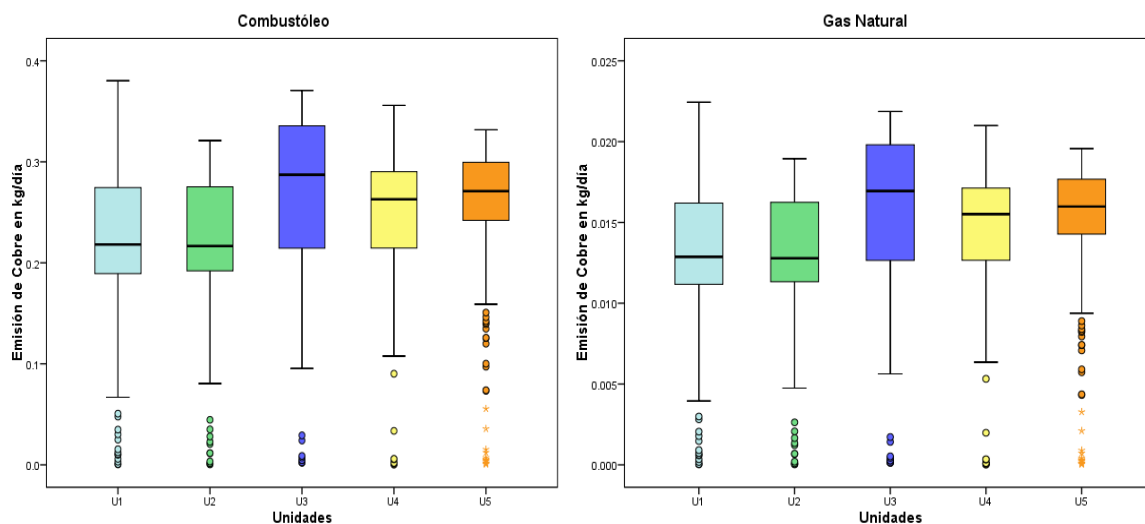
Estadísticos descriptivos Combustóleo (Cromo)

	N(Días en operación)	Kg/día							
		Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Incertidumbre	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
U1	287	0.0002	0.1826	0.108936	0.0349933	0.002065	0.093491	0.110830	0.133442
U2	290	0.0002	0.1583	0.108941	0.0322689	0.001895	0.093567	0.107738	0.134456
U3	273	0.0010	0.1780	0.127464	0.0370880	0.002244	0.103986	0.136789	0.154077
U4	262	0.0001	0.1709	0.118372	0.0321897	0.001988	0.103656	0.126801	0.139476
U5	223	0.0002	0.1593	0.120111	0.0367087	0.002458	0.116204	0.130096	0.143887

Estadísticos descriptivos Gas Natural (Cromo)

	N(Días en operación)	Kg/día							
		Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Incertidumbre	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
U1	287	0.00004	0.03696	0.022047	0.007082	0.000418	0.018921	0.022430	0.027007
U2	290	0.00004	0.03203	0.022048	0.006531	0.000383	0.018937	0.021805	0.027212
U3	273	0.00021	0.03602	0.025797	0.007506	0.000454	0.021045	0.027684	0.031183
U4	262	0.00002	0.03458	0.023957	0.006515	0.000402	0.020978	0.025663	0.028228
U5	223	0.00004	0.03224	0.024309	0.007429	0.000497	0.023518	0.026330	0.029121

Cobre



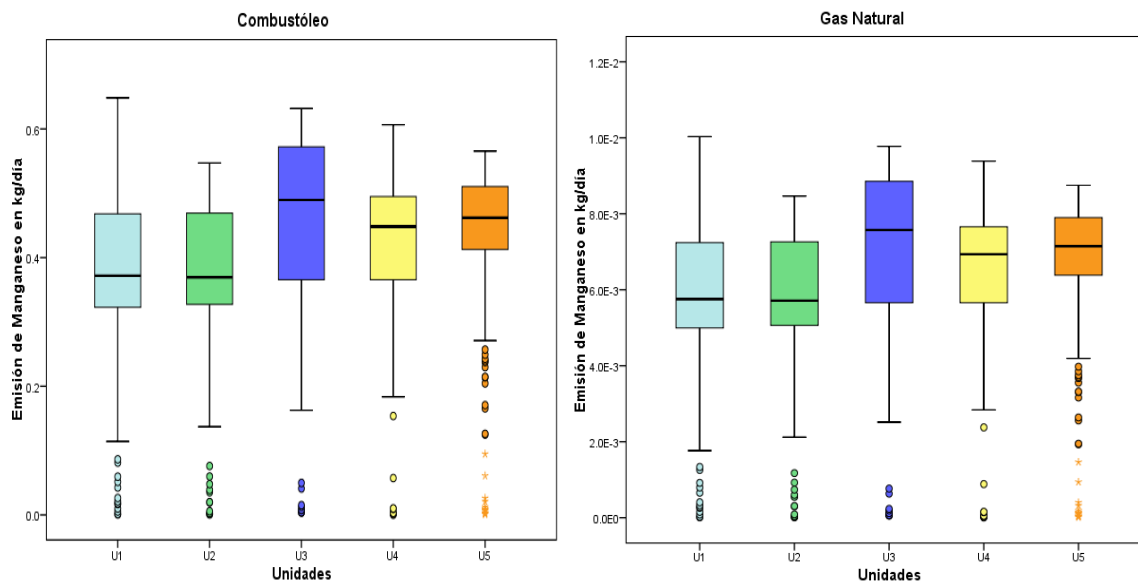
Estadísticos descriptivos Combustóleo (Cobre)

	N(Días en operación)	Kg/día							
		Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Incertidumbre	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
U1	287	0.0004	0.3804	0.2269	0.0729	0.0043	0.1947	0.2308	0.2779
U2	290	0.0004	0.3297	0.2269	0.0672	0.0039	0.1949	0.2244	0.2801
U3	273	0.0021	0.3707	0.2655	0.0772	0.0047	0.2166	0.2849	0.3209
U4	262	0.0002	0.3559	0.2465	0.0670	0.0041	0.2159	0.2641	0.2905
U5	223	0.0004	0.3318	0.2502	0.0765	0.0051	0.2420	0.2710	0.2997

Estadísticos descriptivos Gas Natural (Cobre)

	N(Días en operación)	Kg/día							
		Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Incertidumbre	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
U1	287	0.0000	0.0224	0.0134	0.0043	0.0003	0.0115	0.0136	0.0164
U2	290	0.0000	0.0195	0.0134	0.0040	0.0002	0.0115	0.0132	0.0165
U3	273	0.0001	0.0219	0.0157	0.0046	0.0003	0.0128	0.0168	0.0189
U4	262	0.0000	0.0210	0.0145	0.0040	0.0002	0.0127	0.0156	0.0171
U5	223	0.0000	0.0196	0.0148	0.0045	0.0003	0.0143	0.0160	0.0177

Manganeso



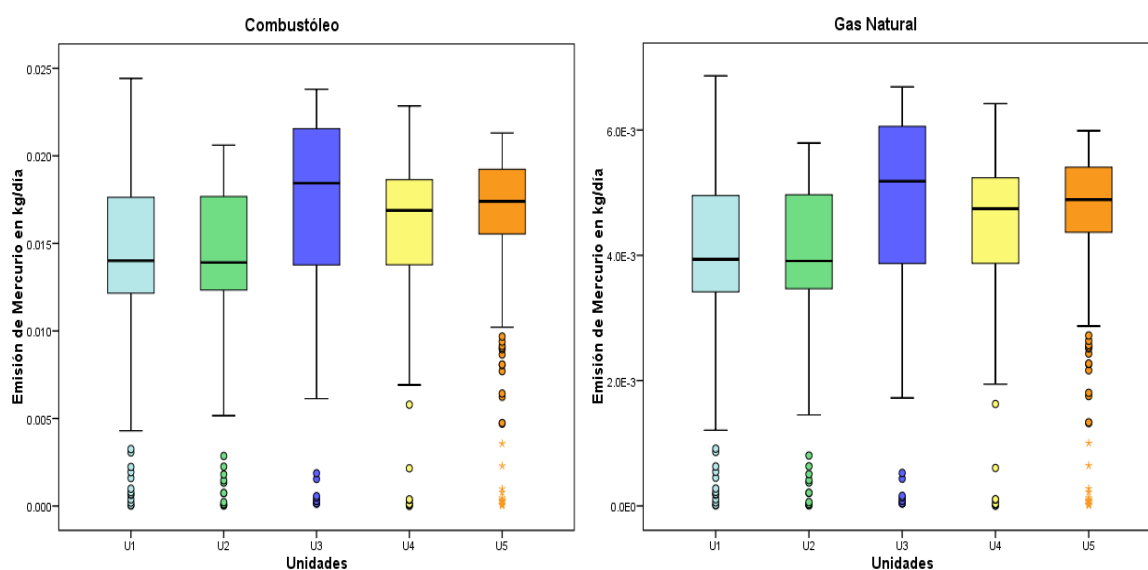
Estadísticos descriptivos Combustóleo (Manganeso)

	N(Días en operación)	Kg/día							
		Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Incertidumbre	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
U1	287	0.0007	0.6484	0.386754	0.1242367	0.007333	0.331920	0.393480	0.473760
U2	290	0.0007	0.5620	0.386774	0.1145640	0.006727	0.332190	0.382500	0.477360
U3	273	0.0036	0.6318	0.452533	0.1316734	0.007969	0.369180	0.485640	0.547020
U4	262	0.0004	0.6066	0.420255	0.1142828	0.007061	0.368010	0.450180	0.495180
U5	223	0.0007	0.5656	0.426430	0.1303268	0.008727	0.412560	0.461880	0.510840

Estadísticos descriptivos Gas Natural (Manganeso)

	N(Días en operación)	Kg/día							
		Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Incertidumbre	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
U1	287	0.00001	0.01003	0.00598	0.00192	0.00011	0.00514	0.00609	0.00733
U2	290	0.00001	0.00870	0.00598	0.00177	0.00010	0.00514	0.00592	0.00739
U3	273	0.00006	0.00978	0.00700	0.00204	0.00012	0.00571	0.00751	0.00846
U4	262	0.00001	0.00939	0.00650	0.00177	0.00011	0.00569	0.00697	0.00766
U5	223	0.00001	0.00875	0.00660	0.00202	0.00014	0.00638	0.00715	0.00790

Mercurio



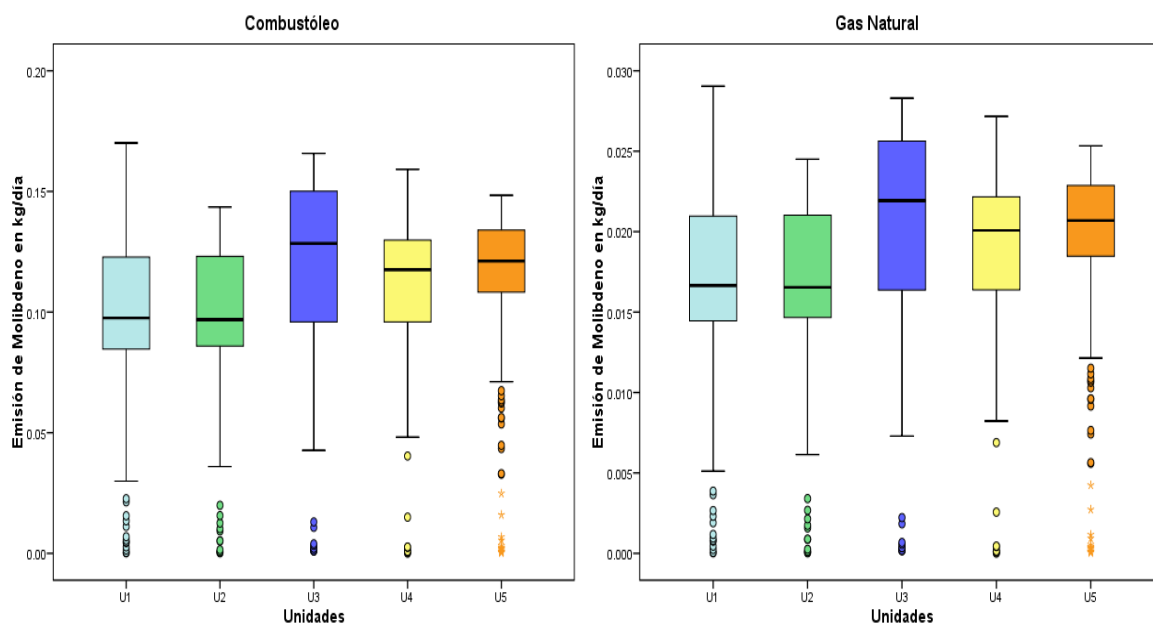
Estadísticos descriptivos Combustóleo (Mercurio)

	N(días en operación)	Kg/día							
		Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Incertidumbre	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
U1	287	0.0000	0.0244	0.014568	0.0046796	0.0002762	0.012502	0.014821	0.017845
U2	290	0.0000	0.0212	0.014568	0.0043152	0.0002534	0.012512	0.014407	0.017981
U3	273	0.0001	0.0238	0.017045	0.0049597	0.0003002	0.013906	0.018292	0.020604
U4	262	0.0000	0.0228	0.015830	0.0043047	0.0002659	0.013862	0.016957	0.018652
U5	223	0.0000	0.0213	0.016062	0.0049090	0.0003287	0.015540	0.017397	0.019242

Estadísticos descriptivos Gas Natural (Mercurio)

	N(Días en operación)	Kg/día							
		Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Incertidumbre	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
U1	287	0.00001	0.00686	0.00409	0.00132	7.76E-05	0.00351	0.00417	0.00502
U2	290	0.00001	0.00595	0.00409	0.00121	7.12E-05	0.00352	0.00405	0.00505
U3	273	0.00004	0.00669	0.00479	0.00139	8.44E-05	0.00391	0.00514	0.00579
U4	262	0.00000	0.00642	0.00445	0.00121	7.47E-05	0.00390	0.00477	0.00524
U5	223	0.00001	0.00599	0.00451	0.00138	9.24E-05	0.00437	0.00489	0.00541

Molibdeno



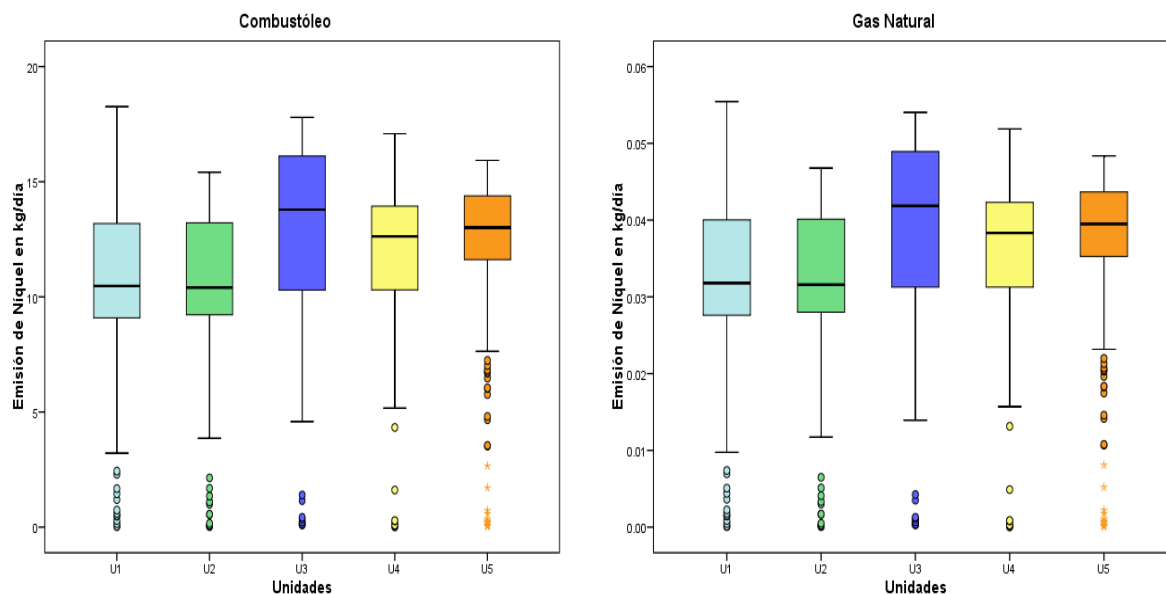
Estadísticos descriptivos Combustóleo (Molibdeno)

	N(Días en operación)	Kg/día							
		Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Incertidumbre	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
U1	287	0.0002	0.1701	0.101459	0.0325914	0.001924	0.087074	0.103223	0.124283
U2	290	0.0002	0.1474	0.101464	0.0300540	0.001765	0.087145	0.100343	0.125227
U3	273	0.0009	0.1657	0.118715	0.0345423	0.002091	0.096848	0.127400	0.143502
U4	262	0.0001	0.1591	0.110247	0.0299802	0.001852	0.096541	0.118097	0.129902
U5	223	0.0002	0.1484	0.111867	0.0341891	0.002289	0.108228	0.121167	0.134010

Estadísticos descriptivos Gas Natural (Molibdeno)

	N(Días en operación)	Kg/día							
		Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Incertidumbre	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
U1	287	0.00003	0.02904	0.017323	0.005565	0.000328	0.014867	0.017624	0.020220
U2	290	0.00003	0.02517	0.017324	0.005131	0.000301	0.014879	0.017132	0.021381
U3	273	0.00016	0.02830	0.020269	0.005898	0.000357	0.016535	0.021752	0.024501
U4	262	0.00002	0.02717	0.018823	0.005119	0.000316	0.016483	0.020163	0.022179
U5	223	0.00003	0.02533	0.019100	0.005837	0.000391	0.018478	0.020687	0.022880

Níquel



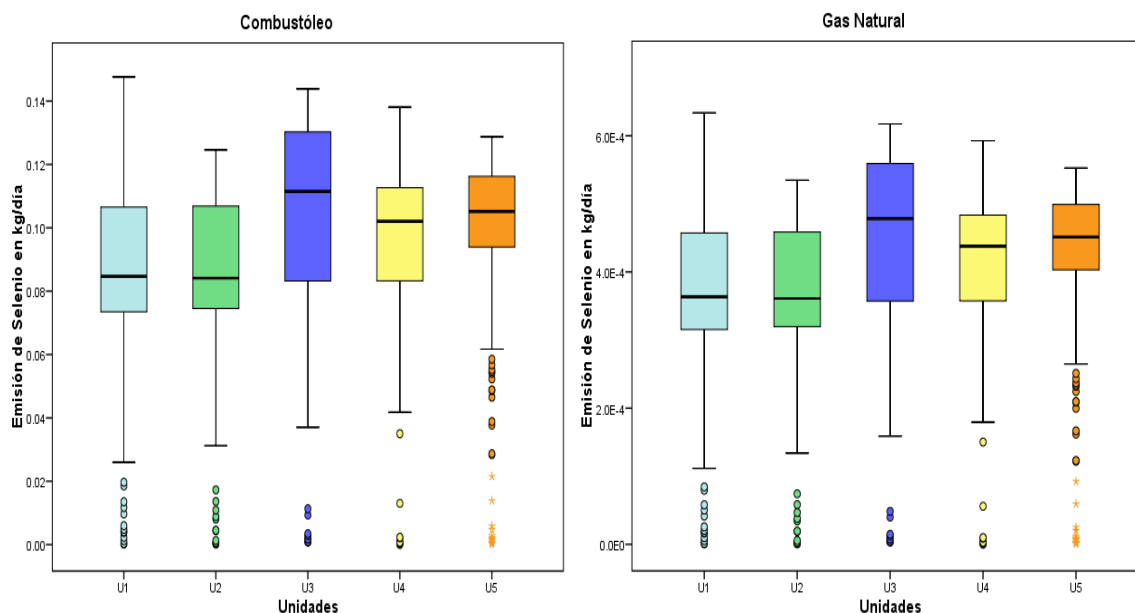
Estadísticos descriptivos Combustóleo(Níquel)

	N (Días de operación)	Kg /día							
		Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Incertidumbre	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
U1	287	0.0203	18.2621	10.8935	3.4993	0.2065	9.3491	11.0830	13.3442
U2	290	0.0203	15.8285	10.8941	3.2268	0.1895	9.3566	10.7737	13.4456
U3	273	0.1014	17.7957	12.7463	3.7088	0.2244	10.3985	13.6788	15.4077
U4	262	0.0101	17.0859	11.8372	3.2189	0.1988	10.3656	12.6800	13.9475
U5	223	0.0203	15.9299	12.0111	3.6708	0.2458	11.6204	13.0096	14.3886

Estadísticos descriptivos Gas Natural (Níquel)

	N (Días de operación)	Kg/día							
		Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Incertidumbre	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
U1	287	0.0001	0.0554	0.0331	0.0106	0.0006	0.0284	0.0336	0.0405
U2	290	0.0001	0.0481	0.0331	0.0098	0.0006	0.0284	0.0327	0.0408
U3	273	0.0003	0.0540	0.0387	0.0113	0.0007	0.0316	0.0415	0.0468
U4	262	0.0000	0.0519	0.0359	0.0098	0.0006	0.0315	0.0385	0.0423
U5	223	0.0001	0.0484	0.0365	0.0111	0.0007	0.0353	0.0395	0.0437

Selenio



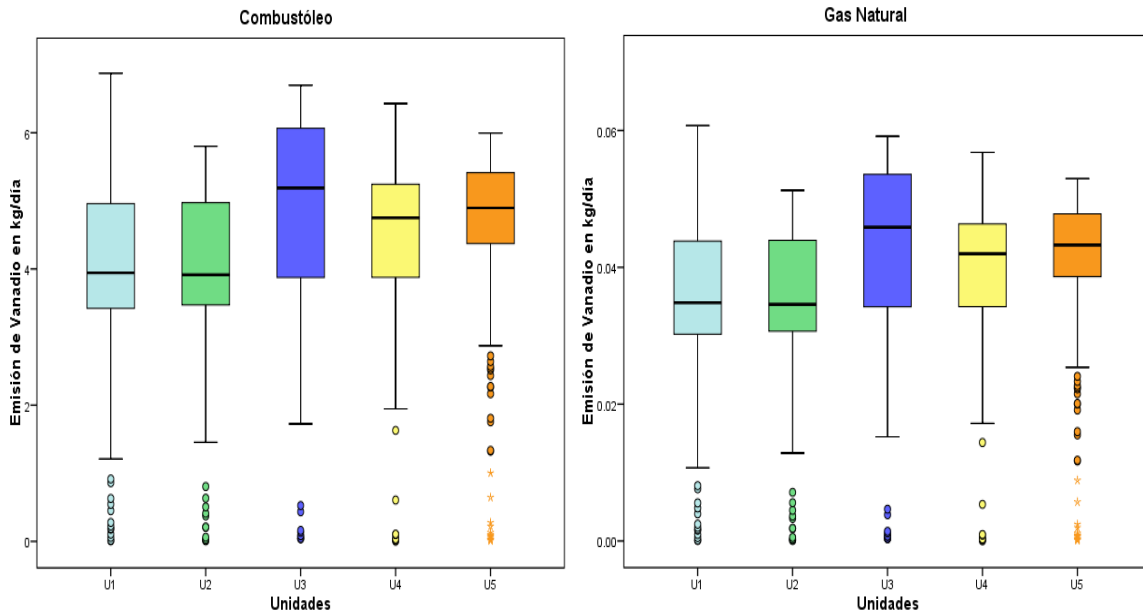
Estadísticos descriptivos Combustóleo (Selenio)

	N(Días en operación)	Kg/día							
		Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Incertidumbre	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
U1	287	0.0002	0.1476	0.088051	0.0282846	0.001669	0.075567	0.089582	0.107859
U2	290	0.0002	0.1279	0.088056	0.0260824	0.001532	0.075629	0.087083	0.108679
U3	273	0.0008	0.1438	0.103027	0.0299776	0.001814	0.084050	0.110564	0.124538
U4	262	0.0001	0.1381	0.095678	0.0260184	0.001607	0.083784	0.102491	0.112736
U5	223	0.0002	0.1288	0.097084	0.0296711	0.001987	0.093926	0.105155	0.116301

Estadísticos descriptivos Gas Natural (Selenio)

	N(Días en operación)	Kg/día							
		Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Incertidumbre	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
U1	287	0.0000	0.00063	0.000378	0.000121	7.17E-06	0.000324	0.000385	0.000463
U2	290	0.0000	0.00055	0.000378	0.000112	6.57E-06	0.000325	0.000374	0.000467
U3	273	0.0000	0.00062	0.000442	0.000129	7.79E-06	0.000361	0.000475	0.000535
U4	262	0.0000	0.00059	0.000411	0.000112	6.90E-06	0.000360	0.000440	0.000484
U5	223	0.0000	0.00055	0.000417	0.000127	8.53E-06	0.000403	0.000451	0.000499

Vanadio



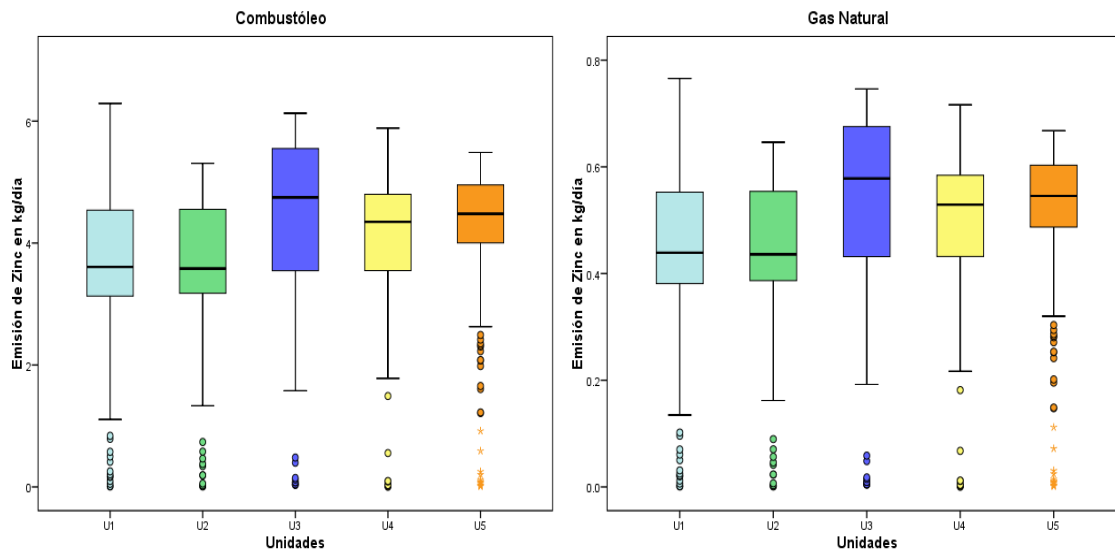
Estadísticos descriptivos Combustóleo (Vanadio)

	N(Días en operación)	Kg/día							
		Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Incertidumbre	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
U1	287	0.0076	6.8726	4.0996	1.3169	0.0777	3.5183	4.1708	5.0218
U2	290	0.0076	5.9568	4.0998	1.2144	0.0713	3.5212	4.0545	5.0600
U3	273	0.0382	6.6971	4.7968	1.3957	0.0845	3.9133	5.1478	5.7984
U4	262	0.0038	6.4300	4.4547	1.2114	0.0748	3.9009	4.7719	5.2489
U5	223	0.0076	5.9949	4.5202	1.3815	0.0925	4.3731	4.8959	5.4149

Estadísticos descriptivos Gas Natural (Vanadio)

	N(Días en operación)	Kg/día							
		Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Incertidumbre	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
U1	287	0.00007	0.0607	0.0362	0.0116	0.0007	0.0311	0.0368	0.0444
U2	290	0.00007	0.0526	0.0362	0.0107	0.0006	0.0311	0.0358	0.0447
U3	273	0.00034	0.0592	0.0424	0.0123	0.0007	0.0346	0.0455	0.0512
U4	262	0.00003	0.0568	0.0394	0.0107	0.0007	0.0345	0.0422	0.0464
U5	223	0.00007	0.0530	0.0399	0.0122	0.0008	0.0386	0.0433	0.0478

Zinc



Estadísticos descriptivos Combustóleo (Zinc)

	N(Días en operación)	Kg/día							
		Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Incertidumbre	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
U1	287	0.0070	6.2891	3.7515	1.2051	0.07113	3.2196	3.8167	4.5955
U2	290	0.0070	5.4510	3.7517	1.1113	0.06525	3.2222	3.7102	4.6304
U3	273	0.0349	6.1285	4.3895	1.2772	0.07730	3.5810	4.7107	5.3061
U4	262	0.0035	5.8840	4.0764	1.1085	0.06848	3.5697	4.3667	4.8032
U5	223	0.0070	5.4859	4.1364	1.2642	0.08465	4.0018	4.4802	4.9551

Estadísticos descriptivos Gas Natural (Zinc)

	N(Días en operación)	Kg/día							
		Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar	Incertidumbre	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75
U1	287	0.0009	0.7656	0.4567	0.1467	0.00866	0.3919	0.4646	0.5594
U2	290	0.0009	0.6636	0.4567	0.1353	0.00794	0.3923	0.4517	0.5637
U3	273	0.0043	0.7460	0.5344	0.1555	0.00941	0.4359	0.5735	0.6459
U4	262	0.0004	0.7163	0.4962	0.1349	0.00834	0.4346	0.5316	0.5847
U5	223	0.0009	0.6678	0.5035	0.1539	0.01031	0.4872	0.5454	0.6032