

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA**

**LA MOLINA**

**FACULTAD DE CIENCIAS**



**“EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE RESPECTO AL SO<sub>2</sub> Y  
SU RELACIÓN CON EL USO DE COMBUSTIBLE DIÉSEL EN  
LIMA”**

Presentado por:

**Raúl Álvaro Suárez Córdor**

Tesis para Optar el Título Profesional de:

**INGENIERO AMBIENTAL**

Lima – Perú

2017

*A mis padres, César y Gladys, mi principal motivación.*

*A mis hermanos, Alan y Fiorella, mis consejeros.*

*A mi mejor amigo, Eltsyn, QEPD.*

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Dirección General de Salud Ambiental, por los datos brindados referentes a las concentraciones de dióxido de azufre.

Al Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería, por los datos brindados referente al combustible diésel.

Al Ministerio de Salud, por los datos brindados referente a las enfermedades respiratorias.

Al profesor Armando Aramayo, por su asesoría y recomendaciones en la elaboración de la investigación.

A la ingeniera Maritza, por su apoyo y tolerancia en todo el transcurso de la realización del presente documento, incondicional para el término de ésta.

A mis amigos, María Fernanda, David, Aracelli, Irma, Bladimir, Yahira y Nathali, que sin su aporte no se hubiera culminado la presente tesis.

## INDICE GENERAL

<b>RESUMEN</b> .....	i
<b>ABSTRACT</b> .....	ii
<b>I. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>II. REVISIÓN DE LITERATURA</b> .....	4
<b>2.1. CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS</b> .....	4
<b>2.2. DIÓXIDO DE AZUFRE (SO<sub>2</sub>)</b> .....	6
2.2.1. Características .....	6
2.2.2. Efectos del dióxido de azufre .....	8
2.2.3. Marco legal .....	10
<b>2.3. COMBUSTIBLES</b> .....	12
2.3.1. Combustibles y diésel .....	12
2.3.2. Azufre en los combustibles .....	15
2.3.3. Situación actual de los combustibles .....	18
2.3.4. Marco legal .....	20
<b>2.4. SITUACIÓN EN LIMA METROPOLITANA Y CALLAO</b> .....	27
2.4.1. Comportamiento del combustible en la ciudad de Lima .....	27
2.4.2. Fuentes Naturales .....	32
2.4.3. Calidad del Aire y Análisis de su Evolución en Lima-Callao .....	32
<b>2.5. ENFERMEDADES RESPIRATORIAS</b> .....	36
<b>2.6. EXPERIENCIAS INTERNACIONALES RELACIONADAS</b> .....	38
2.6.1. Honduras .....	38
2.6.2. Estados Unidos .....	39
2.6.3. Unión Europea.....	40
2.6.4. Zona Metropolitana de la Ciudad de México, México .....	40
2.6.5. Bogotá, Colombia.....	42
2.6.6. Carta Mundial de Combustibles (WWFC) .....	43
<b>2.7. ANÁLISIS DE SERIES DE TIEMPO</b> .....	44
<b>III. MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	46
<b>3.1. MATERIALES</b> .....	46
3.1.1. Datos de las concentraciones de dióxido de azufre .....	46
3.1.2. Datos del contenido de azufre de los combustibles diésel .....	46
3.1.3. Datos de la demanda de combustibles diésel .....	46
3.1.4. Datos del número de casos de enfermedades respiratorias .....	47
<b>3.2. METODOLOGÍA</b> .....	47
3.2.1. Concentraciones de dióxido de azufre .....	49
3.2.2. Contenido de azufre y demanda de los combustibles diésel.....	52

3.2.3.	Influencia del contenido de azufre y demanda de los combustibles diésel en las concentraciones de dióxido de azufre.....	55
3.2.4.	Influencia del dióxido de azufre, contenido de azufre y demanda de los combustibles diésel en las enfermedades respiratorias.....	56
<b>IV.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>58</b>
<b>4.1.</b>	<b>CONCENTRACIONES DE DIÓXIDO DE AZUFRE.....</b>	<b>58</b>
4.1.1.	Estación CONACO .....	59
4.1.2.	Estación C.S. Santa Luzmila.....	62
4.1.3.	Estación del hospital María Auxiliadora .....	65
4.1.4.	Estación del hospital Hipólito Unanue .....	68
4.1.5.	Estación de la dirección de salud I Callao .....	71
4.1.6.	Análisis de datos promediados.....	75
<b>4.2.</b>	<b>CONTENIDO DE AZUFRE Y DEMANDA EN LOS COMBUSTIBLES DIÉSEL.....</b>	<b>85</b>
4.2.1.	Contenido de azufre.....	85
4.2.2.	Demanda de los combustibles diésel.....	91
<b>4.3.</b>	<b>INFLUENCIA DEL CONTENIDO DE AZUFRE Y DEMANDA DE LOS COMBUSTIBLES DIÉSEL EN LAS CONCENTRACIONES DE DIÓXIDO DE AZUFRE.....</b>	<b>94</b>
4.3.1.	Dióxido de azufre y demanda vs tiempo .....	94
4.3.2.	Dióxido de azufre y contenido de azufre vs tiempo .....	98
4.3.3.	Relación entre dióxido de azufre, contenido de azufre y demanda.....	100
<b>4.4.</b>	<b>EFEECTO DEL DIÓXIDO DE AZUFRE, CONTENIDO DE AZUFRE Y DEMANDA DE LOS COMBUSTIBLES DIÉSEL EN LAS ENFERMEDADES RESPIRATORIAS .....</b>	<b>106</b>
4.4.1.	Recolección de registros y análisis estadístico.....	106
4.4.2.	Medidas de control y mitigación.....	110
<b>V.</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>115</b>
<b>VI.</b>	<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>116</b>
<b>VII.</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>118</b>
<b>VIII.</b>	<b>ANEXOS.....</b>	<b>125</b>

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Estándares nacionales de la calidad ambiental del aire. ....	11
Tabla 2: Estándar de Calidad Ambiental para el Dióxido de Azufre SO <sub>2</sub> . ....	11
Tabla 3: Cronograma de reducción progresiva del contenido de Azufre en el Combustible.....	20
Tabla 4: Porcentaje de consumo de combustible diésel respecto al uso automotriz .....	29
Tabla 5: Consumo de combustible diésel de Enero 2009 a Marzo 2011 (gal/día) .....	30
Tabla 6: Especificaciones del diésel automotriz según la WWFC para el contenido de azufre, para las distintas categorías.....	44
Tabla 7: Promedio anual de las concentraciones de dióxido de azufre (SO <sub>2</sub> ) por estación en Lima Metropolitana y el Callao (µg/m <sup>3</sup> ). ....	59

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama típico en la producción de diésel. ....	13
Figura 2: Efecto del Azufre en la vida útil del motor. ....	17
Figura 3: Reducción del contenido de azufre en los combustibles, México. ....	20
Figura 4: Entrada en vigencia de las normativas referentes al contenido de azufre en los combustibles diésel. ....	27
Figura 5: Comportamiento del combustible diésel en Lima. ....	29
Figura 6: Consumo de combustible diésel de Enero 2009 a Mazo 2011 (gal/día) ....	31
Figura 7: Comportamiento anual del dióxido de azufre en Lima y Callao. Periodo 2007 – 2010. ....	33
Figura 8: Estados Unidos: Evolución del contenido de azufre del combustible diésel para uso automotriz, 1970-2006.....	39
Figura 9: Unión Europea: Evolución del contenido de azufre del combustible diésel para uso automotriz, 1970-2006.....	40
Figura 10: Concentración de dióxido de azufre atmosférico para la ZMCM ....	41
Figura 11: Índice de porcentaje de exceso a la norma anual de dióxido de azufre en Bogotá. ....	42
Figura 12: Representación de una serie temporal. ....	44
Figura 13: Distribución zonal, por distritos, de Lima Metropolitana y Callao ....	48
Figura 14: Red básica de monitoreo de la calidad del aire.....	50
Figura 15: Ubicación de la estación de monitoreo CONACO ....	60
Figura 16: Concentraciones mensuales de SO <sub>2</sub> en la estación de monitoreo de Lima Centro, CONACO.....	61
Figura 17: Concentraciones anuales de SO <sub>2</sub> en la estación de monitoreo de Lima Centro, CONACO.....	62
Figura 18: Ubicación de la estación de monitoreo C.S. Santa Luzmila.....	63
Figura 19: Concentraciones mensuales de SO <sub>2</sub> en la estación de monitoreo de Lima Norte, C.S. Santa Luzmila.....	64
Figura 20: Concentraciones anuales de SO <sub>2</sub> en la estación de monitoreo de Lima Norte, CS Santa Luzmila ....	65
Figura 21: Ubicación de la estación de monitoreo del Hospital María Auxiliadora. ....	66

Figura 22: Concentraciones mensuales de SO <sub>2</sub> en la estación de monitoreo de Lima Sur, Hospital María Auxiliadora.....	67
Figura 23: Concentraciones anuales de SO <sub>2</sub> en la estación de monitoreo de Lima Sur, Hospital María Auxiliadora.....	68
Figura 24: Ubicación de la estación de monitoreo del Hospital Hipólito Unanue .....	69
Figura 25: Concentraciones mensuales de SO <sub>2</sub> en la estación de Lima Este, Hospital Hipólito Unanue.....	70
Figura 26: Concentraciones anuales de SO <sub>2</sub> en la estación de monitoreo de Lima Este, Hospital Hipólito Unanue.....	71
Figura 27: Ubicación de la estación de monitoreo de la Dirección de Salud I Callao. ....	72
Figura 28: Concentraciones mensuales de SO <sub>2</sub> en la estación de monitoreo de Callao .....	73
Figura 29: Concentraciones anuales de SO <sub>2</sub> en la estación de monitoreo de Callao.....	74
Figura 30: Concentración anual del dióxido de azufre (SO <sub>2</sub> ) en las 5 estaciones de monitoreo de la ciudad de Lima, de enero 2000 a diciembre 2013.....	76
Figura 31: Comportamiento espacial de las concentraciones de dióxido de azufre, 2000. .	78
Figura 32: Comportamiento espacial de las concentraciones de dióxido de azufre, 2007. .	79
Figura 33: Comportamiento espacial de las concentraciones de dióxido de azufre, 2014. .	80
Figura 34: Concentración mensual del dióxido de azufre (SO <sub>2</sub> ) en las 5 estaciones de monitoreo de la ciudad de Lima, de enero 2000 a diciembre 2013.....	82
Figura 35: Concentración promedio del dióxido de azufre. Periodo 2005 – 2013.....	84
Figura 36: Contenido de azufre en los diésel distribuidos en Lima y Callao, según su el tipo de diésel (2005 - 2013).....	87
Figura 37: Contenido de azufre en los combustibles diésel distribuidos en Lima y Callao (ppm), 2005 – 2010.....	88
Figura 38: Contenido de azufre en el diésel b5 (2011 - 2013).....	88
Figura 39: Comparación entre contenido de azufre y normativas promulgadas. ....	90
Figura 40: Demanda de los combustibles diésel según su tipo, en la ciudad de Lima. ....	92
Figura 41: Demanda de los combustibles diésel en la ciudad de Lima, periodo 2005 – 2013 .....	93
Figura 42: Concentración de dióxido de azufre (SO <sub>2</sub> ) vs Demanda (Miles de galones al mes) .....	95
Figura 43: Concentración de dióxido de azufre (SO <sub>2</sub> ) vs Demanda-Tipos de combustible diésel (Miles de galones al mes) .....	97

Figura 44: Concentración de dióxido de azufre (SO <sub>2</sub> ) y Contenido de azufre (ppm) vs Tiempo .....	99
Figura 45: Correlación gráfica entre el dióxido de azufre, contenido de azufre y demanda de combustibles diésel (Valores mensuales) .....	101
Figura 46: Correlación de Contenido de azufre (ppm) vs Concentraciones de dióxido de azufre (µg/m <sup>3</sup> ).....	103
Figura 47: Concentración de dióxido de azufre (SO <sub>2</sub> ) vs Demanda (Miles de galones al mes) .....	105
Figura 48: Número de casos por enfermedades respiratorias relacionadas al SO <sub>2</sub> , en las zonas de Lima. ....	106
Figura 49: Número de casos por enfermedades respiratorias relacionadas al SO <sub>2</sub> , Lima Metropolitana.....	107
Figura 50: Correlación gráfica entre el dióxido de azufre, contenido de azufre, demanda de combustibles diésel y enfermedades (Valores anuales) .....	108

## INDICE DE ANEXOS

ANEXO 1: Concentraciones de dióxido de azufre ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) en Lima Metropolitana y el Callao .....	125
ANEXO 2: Contenido de azufre en los combustibles diésel – Refinerías y plantas de abastecimiento .....	130
ANEXO 3: Demanda de los combustibles diésel en Lima Metropolitana y el Callao. ....	135
ANEXO 4: Número de casos por enfermedades respiratorias, por año y zona. ....	138
ANEXO 5: Cuadro cronológico de la legislación relacionada al contenido de azufre en los combustibles diésel.....	139
ANEXO 6: Cálculos realizados en el programa R. ....	141

## RESUMEN

El presente estudio tiene como principal objetivo evaluar la influencia del cambio en el contenido de azufre en los combustibles diésel y su demanda, en las concentraciones del dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) en la ciudad de Lima y Callao, y de éste último, al impacto en la salud de las personas, y el cual fue realizado enfocado a 4 puntos principales: las concentraciones de dicha variable en la ciudad de Lima y Callao, el contenido de azufre y normativas respecto a los combustibles diésel, la demanda de dicho combustible en el área de estudio y el número de casos de enfermedades respiratorias. En el primer punto, se evaluó el comportamiento de las concentraciones en determinadas estaciones de monitoreo. Para el segundo, se evaluó el contenido de azufre en los combustibles diésel, así como sus normativas relacionadas. Como tercer punto, se realizó la evaluación de la demanda de dichos combustibles comercializados y consumidos. Por último, se realizó el análisis de los casos de enfermedades respiratorias más relacionadas al  $\text{SO}_2$ . Finalmente, se correlacionó dichos resultados para detectar tendencias y relaciones entre las variables de concentraciones vs contenido de azufre, obteniendo una relación directa, y concentraciones vs demanda, verificando una relación indirecta y directa, en periodos diferenciados. Adicionalmente, con ayuda del programa R, dichos análisis se correlacionaron al impacto en la salud de las personas, resultando de mayor significancia las concentraciones de  $\text{SO}_2$  en la atmósfera, y arrojando una relación directa entre las variables. La presente tesis implica una aproximación a la calidad del aire y la calidad de los combustibles diésel en el ámbito de Lima Metropolitana y Callao, que deberá ser complementado la inclusión de otras variables no contempladas en el documento, además de ser una primera aproximación para estudios más específico en zonas determinadas.

**Palabras clave:** Dióxido de azufre, contenido de azufre, combustibles diésel, enfermedades respiratorias, calidad del aire.

## ABSTRACT

The present study has as main objective to evaluate the influence of the change in the sulfur content in the diesel fuels and their demand, in the concentrations of sulfur dioxide (SO<sub>2</sub>) in the city of Lima and Callao, and of the latter, to the impact In the health of the people, and which was focused on 4 main points: the concentrations of this variable in the city of Lima and Callao, the sulfur content and regulations regarding diesel fuels, the demand for such fuel in the Area of study and the number of cases of respiratory diseases. In the first point, the behavior of the concentrations in certain monitoring stations was evaluated. For the second, the sulfur content in diesel fuels, as well as their related regulations, was evaluated. As a third point, the evaluation of the demand of said commercialized and consumed fuels. Finally, the analysis of cases of respiratory diseases more related to SO<sub>2</sub> was carried out. Finally, these results were correlated to detect trends and relationships between the variables of concentrations vs sulfur content and concentrations vs demand, verifying the impact and relation between the points studied, with a direct relation between the first two variables and an indirect and direct relation between the last 2 variables, in different periods. Additionally, with software R, these analyzes were correlated to the impact on the health of the people, resulting in higher concentrations of SO<sub>2</sub> in the atmosphere, and a direct relationship between the variables. This thesis implies an approximation to air quality and the quality of diesel fuels in Lima y Callao, which should be complemented by the inclusion of other variables not included in the document, as well as being a first approximation for more specific studies in specific areas

**Keywords:** sulfur dioxide, sulfur content, diesel fuel, respiratory diseases, air quality.

## I. INTRODUCCIÓN

La contaminación atmosférica es uno de los principales problemas que está afectando la sociedad de hoy en día, debido al impacto que tiene en la salud pública y en general la calidad de vida de la población. Dicha contaminación puede ser debida a diferentes factores como son las emisiones de la gran cantidad de industrias, el parque automotor, el desarrollo tecnológico, entre otros, lo que hace necesario realizar las investigaciones necesarias para su control y el cuidado de las personas y el ambiente (Altamar, 2006).

La evaluación del contaminante  $\text{SO}_2$  y su análisis temporal, nos otorga un comportamiento promedio en la ciudad de Lima, su relación con el uso de combustible diésel y el impacto al estado de la calidad del aire, mediante la verificación del cumplimiento de ciertos parámetros de reformulación para el ingreso de nuevos combustibles e identificando si la calidad del aire se ha agravado con el tiempo o ha ido mejorando con las nuevas políticas implementadas.

El análisis multianual de las concentraciones de  $\text{SO}_2$  muestra periodos críticos y concentraciones admisibles comparadas con los ECAs establecidos, que además se complementan con diversos estudios sobre la calidad del aire en la ciudad de Lima, presentando que medidas serán necesarias tomar por la población para evitar una contaminación significativa del ambiente en que se desarrollan.

Según lo promulgado en D.S. N° 025-2005-EM, que entró en vigencia en Julio del año 2005, respecto a la reducción progresiva del azufre en los combustibles diésel N° 1 y 2, se exhorta a la reducción de este compuesto en los combustibles para evitar la contaminación atmosférica por parte del  $\text{SO}_2$  que se genera y estar acorde al cumplimiento de los ECAs establecidos respecto a este contaminante; y comprobando en el Estudio de Saturación realizado por la DIGESA en el 2011, los valores del dióxido de azufre han disminuido considerablemente de los resultados obtenidos en el estudio del año 2000, debido a la

reducción del contenido de azufre en los combustibles, así como otros estudios que sostienen la misma premisa. Actualmente, y según los resultados publicados por la DIGESA en su página web, en el Programa Nacional de Vigilancia Sanitaria de Calidad del Aire, las concentraciones promedio de dióxido de azufre para el año 2013 no superan los parámetros del ECA vigente desde el 1 de enero del 2009.

Obtener una mejor percepción del problema ambiental atmosférico es fundamental, sobre el contaminante  $\text{SO}_2$  y la responsabilidad y conciencia por parte de la población de acuerdo al impacto que podrían generar al ambiente por el aumento en la adquisición de automóviles personales o el uso de combustibles de mala calidad, sin mencionar el agravio al problema de la congestión vehicular en una ciudad cuyo sistema vial ya ha sido superada, así como el aporte a la contaminación de la atmósfera, ya perjudicada por las emisiones de las industrias que se han ido incrementando. Así mismo, la interpretación de una mejora en la formulación en el combustible diésel y su consumo y su relación a la contaminación atmosférica, permite la adopción de ciertas medidas para el control y mitigación mediante el planteamiento de relaciones estratégicas y colaboraciones entre entidades privadas y estatales, para llegar a alcanzar la formulación de políticas en beneficio de la mejora de la calidad del aire, que repercutirá directamente en la salud de las personas que habitan en Lima, la ciudad con mayor actividad industrial y automotora del Perú, y donde se alberga un significativo porcentaje de la población peruana.

El tipo de investigación ejecutada en la presente tesis analiza las concentraciones del dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) en el aire ambiental, el contenido de azufre (S) y la demanda en el combustible diésel y el número de casos de enfermedades respiratorias registradas en Lima Metropolitana y Callao, en un periodo de tiempo determinado que comprende un estudio de datos históricos, para apreciar su comportamiento hasta a la actualidad.

Así, la presente investigación permitirá evaluar la influencia del cambio del contenido de azufre en la composición del diésel distribuido, antes y después de las diferentes normativas que se han promulgado entorno a dicha característica, en la concentración de  $\text{SO}_2$  en la atmósfera de la ciudad de Lima, mediante el análisis de las concentraciones de este contaminante criterio en las 5 estaciones de monitoreo del DIGESA, que a escala general, llegan a representar toda el área geográfica que es la ciudad de Lima. Paralelo a estos

cálculos, la evaluación de la demanda de combustibles diésel en el periodo de estudio nos permite conocer el comportamiento respecto al consumo y buscar la correlación entre las concentraciones del  $\text{SO}_2$  en el aire ambiental y la composición del combustible diésel, verificando los aumentos o disminuciones de cada uno de los parámetros respecto a las otras variables. Por último, la evaluación del comportamiento de las enfermedades respiratorias y la relación con las variables mencionadas, permitirá identificar mejoras o implementación de controles para el cuidado de la salud de las personas.

Así mismo, cabe señalar que la aceptación o rechazo de la hipótesis planteada “con la introducción de nuevos contenidos de azufre (S) en los combustibles diésel, se logrará la disminución de las concentraciones de dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) en la atmósfera de la ciudad de Lima, mejorando la calidad del aire, a pesar del aumento en la demanda del combustible diésel”, responderá al hecho de que la disminución de las concentraciones de dióxido de azufre en la atmósfera con el transcurrir del tiempo, se relacione indirectamente con la demanda de combustibles que ha ido en aumento y tenga una correlación directa con el contenido de azufre en los diésel, el cual también ha ido en disminución por las normativas promulgadas.

La presente tesis busca encontrar las influencias existentes entre las concentraciones de dióxido de azufre en la atmósfera y la calidad de los combustibles diésel, así como el efecto en la salud de las personas, por lo que se plantea los siguientes objetivos:

- Determinar la tendencia y proyección de las concentraciones de dióxido de azufre en la atmósfera de Lima y Callao.
- Determinar el comportamiento y proyección de los combustibles diésel respecto a su contenido de azufre y demanda.
- Establecer la relación e influencia del contenido de azufre y demanda de los combustibles diésel en las concentraciones de dióxido de azufre.
- Establecer la relación y el efecto del dióxido de azufre, contenido de azufre y demanda de los combustibles diésel en las enfermedades respiratorias, así como las medidas de control y mitigación.

## **II. REVISIÓN DE LITERATURA**

### **2.1. CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS**

Tanto la OMS como el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), citado por el Clean Air Institute (2013), han resaltado la contaminación ambiental del aire como un punto estratégico para tomar medidas a las causas de mortalidad y morbilidad a nivel mundial. Además, señalan que en ambientes urbanos, dicha contaminación es principalmente el resultado de la quema de combustibles fósiles, cuyas fuentes más significativas provienen de los sectores de transporte, generación de energía, industrial y manufactura, así como el uso doméstico de ciertos combustibles; todo esto sumado a la ejecución de ciertas actividades que contribuyen al aumento de las emisiones, que incrementan la degradación ambiental del aire de las zonas urbanas. Otros factores importantes corresponden al uso no controlado del suelo, deficiente planeamiento del transporte, la utilización de combustibles de mala calidad, las actividades productivas con alta demanda energética y la capacidad limitada de gestión de la calidad del aire.

Angulo (2009) menciona que los contaminantes atmosféricos, en su estado físico pueden estar presentes en forma de gases o partículas; los gases cuando se disipan ya no se depositan, caso contrario a las partículas, cuya rapidez de dispersión se da por el tamaño de dicha partícula. Las partículas grandes producen sus efectos cercanos a la fuente, ya que caen más rápido; las medianas se alejan y se depositan más lejanos a la fuente, mientras que las pequeñas son transportadas por acción del viento a mayores distancias. Así mismo, por su composición química, los contaminantes se pueden clasificar en orgánicos e inorgánicos, donde en esta última categoría se encuentra el dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) y que ocupa la mayor proporción de emisiones en la quema de los combustibles fósiles sólidos y líquidos, actividad principalmente de origen antropogénico. Finalmente, su oxidación a ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) hace que el gas retorne a la superficie terrestre incorporado en el agua de lluvia y lo que provoca la acidificación del terreno.

Cada contaminante tiene un potencial distinto para producir ciertos efectos sobre la salud de las personas. Dicho potencial va a depender de distintos factores como el tipo de contaminante, sus propiedades fisicoquímicas, dosis acumulada, concentración, la frecuencia, intensidad y duración de la exposición, que es el contacto de una persona o grupo de personas con un contaminante en un lugar y un tiempo específico (Monn, 2000, citado por la Comisión Ambiental Metropolitana), entre otros. Además, la capacidad de un contaminante para producir un efecto en la salud depende fundamentalmente de la magnitud de la exposición, que guarda relación directa con la concentración del contaminante en la atmosfera, la duración y frecuencia, y la vulnerabilidad de las personas expuestas, que varía significativamente en grupos que son más sensibles que otros (Kampa y Castanas 2008, citado por la Comisión Ambiental Metropolitana).

Riojas et al., citado por la Comisión Ambiental Metropolitana (2009) señalan que la exposición frente a los contaminantes atmosféricos se da en forma aguda y crónica. La aguda se da en un corto periodo de tiempo pero con concentraciones mayores y que llegan a producir ciertos efectos en la salud. Estos efectos varían de acuerdo a las características antes mencionadas, sin embargo, estudios revelan un incremento en la mortalidad, principalmente a complicaciones respiratorias relacionadas a la exposición a partículas pequeñas, y también a problemas cardiovasculares, que sin embargo, otros estudios sostienen que es un efecto indirecto a la contaminación. Además, esta exposición aguda a los contaminantes atmosféricos, guarda una relación con enfermedades de vías respiratorias superiores e inferiores: bronquitis, neumonía y tos, entre otras. Por otra parte la exposición crónica se relaciona a las bajas concentraciones en largos periodos. Esta exposición a niveles bajos, puede llegar a afectar a las personas con una predisposición genética o con algún problema de salud preexistente y los efectos a la salud son similares que por una exposición aguda. Existen informes de la relación directa que guarda la mortalidad y una exposición crónica. Sin embargo, dicha relación no se concluye, ya que la mayoría de casos correspondía a personas con antecedentes en problemas respiratorios o cardiovasculares. (Cesar et al., 2001, citado por la Comisión Ambiental Metropolitana).

La Comisión Ambiental Metropolitana (2010) indica que los síntomas por exposición a la contaminación del aire se manifiestan principalmente en la disminución de la capacidad respiratoria, incremento en la frecuencia de enfermedades respiratorias crónicas y agudas,

aumento de ataques de asma e incremento de casos de enfermedades cardiacas. Esto se debe a que los pulmones son el órgano de choque para todos los contaminantes del aire, y cuando las células de las vías aéreas del pulmón se inflaman, se reduce la habilidad del sistema respiratorio para combatir infecciones y eliminar partículas extrañas, lo que aumenta el riesgo en la salud de las personas. Aun así, la relación de los efectos que provocan algunos contaminantes atmosféricos respecto a ciertas enfermedades cardiacas o cardiovasculares, no están determinados completamente.

## **2.2. DIÓXIDO DE AZUFRE (SO<sub>2</sub>)**

### **2.2.1. Características**

Es un gas incoloro de olor picante que al oxidarse y combinarse con agua forma ácido sulfúrico, principal componente de la lluvia acida. Reacciona con facilidad con los oxidantes o partículas atmosféricas, formando sulfatos y partículas de ácido sulfúrico ambos más tóxicos que el SO<sub>2</sub> original. Además no es inflamable ni explosivo, altamente soluble en agua y que puede permanecer en la atmosfera entre 2 a 4 días durante el cual puede ser transportado a miles de kilómetros y formar el ácido sulfúrico (Harte et al. INE y SEMARNAT, citados por Carbajal, 2010).

Como menciona la ficha técnica (INEI, 2011) el dióxido de azufre o anhídrido sulfuroso, cuya unidad de medida es el  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , un gas incoloro, no inflamable, que puede encontrarse en el aire, en forma gaseosa o disuelto en las gotas de agua que están suspendidas en la atmósfera, cuyas formas son perjudiciales al hombre, causando irritación en los ojos, las mucosas y las vías respiratorias. Además tiene aplicaciones en la industria química, como agente reductor en metalurgia, como frigorígeno en la industria del frío, como desinfectante y blanqueador, para la conservación de sustancias alimenticias, como decolorante y fumigante y hasta un 98% del SO<sub>2</sub> técnico se utiliza para la producción de trióxido de azufre como precursor del ácido sulfúrico.

Además, Fernández (2009), indica que dicho gas, tiene su principal origen en la combustión del carbón y el petróleo, y que los ciudadanos y sus entornos urbanos aledaños a estas

industrias, se encuentran en el radio de acción directo de los focos emisores de este gas. Dichas industrias se componen principalmente de las centrales termoeléctricas, las refinerías, los hornos, la fundición de metales, las calderas de calefacción o los motores diésel son algunos de los principales causantes de este compuesto. Así mismo, se ha comprobado que el humo de los cigarrillos esconde  $\text{SO}_2$  junto a otras sustancias tóxicas, así como algunas actividades consideradas más ecológicas, como las plantas de biomasa, de geotermia o de cogeneración eléctrica a partir de purines de cerdo. Mientras que para un origen natural se da a partir de las erupciones volcánicas u oceánicas (fumarolas), los cuales, sin embargo, tienen una proporción menor en comparación con las emisiones antropogénicas. Se estima que el  $\text{SO}_2$  de origen natural llega a representar el 25% del total que llega a la atmósfera.

También es un gas que se origina tanto de fuentes naturales como antropogénicas y es emitido a la atmósfera, como las asociadas a la quema de combustibles fósiles, biomasa y a la fundición de metales, mencionadas anteriormente. Las emisiones naturales de azufre son de los océanos, en la forma de dimetilsulfuro (DMS), y las emisiones volcánicas, mientras que de las antropogénicas se produce por combustión de combustibles fósiles, plantas generadoras de electricidad y procesos industriales, siendo la mayor contribución por parte de la combustión de energéticos que contienen azufre (GDF citado por Nava et al., 2003 y Venegas, 2010) y de fuentes móviles en menor grado, lo que conlleva a que se generen problemas respecto a la calidad del aire en áreas urbanas e industriales (Clean Air Institute, 2013). Los efectos principales del  $\text{SO}_2$  han sido ampliamente descritos como dañinos para la salud humana, así como para la vegetación y los materiales (DOF y Flores et al., citado por Nava et al. 2005). Además, el azufre también forma sulfatos en la atmósfera que son constituyentes de los aerosoles higroscópicos, pues forman parte de las brumas que se observan en las ciudades contaminadas. Asimismo, la presencia de  $\text{SO}_2$  contribuye a la precipitación ácida, ya que es hidrosoluble y da lugar a ácidos, lo que le confiere características potencialmente dañinas al estar involucrado en la transformación de gases en partículas de aerosoles. (DOF y GDF, citado por Nava et al. 2005 y Córdova, 2007).

### 2.2.2. Efectos del dióxido de azufre

Produce necrosis en plantas en función de la dosis, alteración en los contenidos de azúcares y proteínas y pérdida de productividad; causan irritaciones oculares y respiratorias en animales a dosis elevadas; aunque más efectos parecen tener los sulfatos secundarios. Sin embargo, el principal efecto viene dado por las reacciones que originan, una vez dispersado en el medio ambiente y mezclado con las moléculas de agua de las precipitaciones, produciendo ácido sulfúrico disuelto, origen principal de la lluvia ácida (Córdova, 2007). Además, mediante la acción del viento, se favorece su transporte, llegando a recorrer gran cantidad de kilómetros y precipitarse tanto en ciudades, bosques, cuerpos de agua, y demás lugares hasta donde hayan sido transportadas dichas partículas. El efecto directo se da en los daños en seres vivos, en la tierra o en los edificios, siendo un impacto material. Sin embargo no se debe considerar que la cantidad que se llega a emitir a la atmósfera es la única variable directamente relacionada a los impactos producidos, un papel muy importante es la situación atmosférica que favorece o dificulta su dispersión (Fernández, 2009)

El dióxido de azufre en altas concentraciones es nocivo para los pulmones, ya que es considerado un irritante respiratorio que puede agravar las condiciones cardiopulmonares, contribuir a enfermedades respiratorias y a la dificultad para respirar. El ácido sulfúrico, cuyo precursor es el  $\text{SO}_2$ , es la otra especie crítica en la formación de la lluvia ácida, que contribuye a un amplio daño en los ecosistemas. Los sulfatos en forma de partículas son una preocupación significativa en la salud pública así como uno de los grupos de contaminantes responsables de la disminución de la visibilidad (Blumberg et. al, 2003).

La respuesta del organismo a concentraciones elevadas de  $\text{SO}_2$  se manifiesta por síntomas como tos, irritación de nariz y garganta, seguidos de bronco-constricción y disnea, especialmente en individuos asmáticos; estos síntomas se ven agravados si la exposición se da en combinación con ejercicio físico (Quénel et al.; Kampa y Castanas, citado por la Comisión Ambiental Metropolitana, 2010?). Además, dichos elementos, el  $\text{SO}_2$ , el ácido sulfúrico y las sales de sulfato son irritantes de las mucosas del tracto respiratorio y es aún más tóxico en presencia del material particulado. La respuesta fisiológica umbral para personas sensibles es del orden de 1-5 partes por millón. (Venegas, 2010)

En ese sentido, el dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) puede incrementar o perjudicar los síntomas de personas con problemas respiratorios o cardíacos (Clean Air Institute, 2013), y de acuerdo con la Comisión Europea de Salud y Protección al Consumidor (2007), los grupos más vulnerables a una mala calidad del aire y por ende expuestos a los contaminantes atmosféricos son los menores de edad, adultos mayores (personas mayores de 60 años) y también mujeres embarazadas. Así mismo, si bien estos grupos suelen ser los más vulnerables, por las mismas condiciones físicas de la edad o estado, también hay grupos seriamente afectados por la mala calidad del aire, que son las personas expuestas a dichos contaminantes y que conviven con ellos, como los trabajadores de plantas industriales o que vivan en zonas aledañas a ellas, o las que realizan la mayor parte de sus actividades al aire libre, en una ciudad con problemas de contaminación atmosférica (British Columbia, 2014).

En el artículo de Calidad del aire exterior, Dióxido de Azufre, de British Columbia (2014), se señala que a una exposición prolongada al dióxido de azufre y partículas producto de la reacción de este mismo SO<sub>2</sub> con otros componentes, el cuerpo puede llegar a absorberlo por la nariz e ir hacia los pulmones, llegando a dañar la membrana que los recubre y originando enfermedades cardíacas y respiratorias, o empeorarlas en el caso de que ya existiesen en el receptor, tales como el enfisema o la bronquitis. La reducción en la capacidad de respirar profundamente o tomar mayor cantidad de aire con cada inspiración, también son signos del efecto del SO<sub>2</sub> en el organismo de una persona. Respecto a la contaminación a corto plazo y a concentraciones altas del dióxido de azufre, ésta puede causar problemas de salud a un grupo de personas más sensibles, como son personas con asma, niños pequeños y personas mayores. Los síntomas pueden incluir constricción o estrechamiento de las vías respiratorias en los pulmones, tos, sibilancia y falta de aire, así como irritación del sistema respiratorio y de los ojos. Para estas personas sensibles, la exposición al dióxido de azufre puede resultar en visitas más frecuentes a urgencias y hospitalizaciones debidas a enfermedades respiratorias.

En un artículo de la OMS (2005), señala que en un estudio realizado en Hong Kong (Hedley et al., 2002), se consiguió una reducción importante del contenido de azufre de los combustibles durante un periodo muy breve de tiempo y ha sido vinculado a una reducción sustancial de los efectos en la salud, como enfermedades respiratorias en la infancia y mortalidad en todas las edades. Aun así, todavía existe incertidumbre acerca de si el SO<sub>2</sub> es

el contaminante responsable de los efectos adversos observados o si se toma en lugar de las partículas ultrafinas o alguna otra sustancia que guarda correlación con él. Tanto en Alemania (Wichmann et al., 2000) como en los Países Bajos (Buringh, Fisher & Hoek, 2000) se registró una fuerte reducción de las concentraciones de SO<sub>2</sub> durante un decenio, y aunque la tasa de mortalidad disminuyó, no se consideró que exista una relación directa entre el SO<sub>2</sub> y la mortalidad, y al contrario, se atribuyó dicho comportamiento similar al del material particulado. Mientras que Fernández (2009) indica que diversas investigaciones han relacionado el aumento de la concentración de este gas en el medio ambiente con el incremento de enfermedades y la mortalidad en personas mayores. *Journal of Epidemiology and Community Health* citado por Fernández (2009) realizó un estudio en la que midió en Valencia los niveles diarios de varios contaminantes, entre ellos el SO<sub>2</sub>, entre los años 1994 y 1996. El cruce de los resultados de dicho datos con los ingresos de urgencias en los dos principales hospitales de la ciudad resultó que por cada aumento de 10 microgramos por metro cúbico de SO<sub>2</sub>, los registros por enfermedades cardiovasculares se incrementaban en un 3%.

### **2.2.3. Marco legal**

Según Decreto Supremo N° 003-2008-MINAM que aprueba los estándares nacionales de calidad ambiental para aire, publicado el 21 de agosto de 2008:

Donde el Artículo 3 refiere a la vigencia de Estándares de Calidad Ambiental para Aire establecidos para el Dióxido de Azufre (SO<sub>2</sub>): Los Estándares de Calidad Ambiental para Aire establecidos para el Dióxido de Azufre en el Decreto Supremo N° 074-2001-PCM mantienen su vigencia hasta el 31 de diciembre de 2008. Como se muestra en la Tabla 1, las características del monitoreo de SO<sub>2</sub> atmosférico.

**Tabla 1: Estándares nacionales de la calidad ambiental del aire.**

Contaminante	Periodo	Forma del Estándar		Método de análisis
		Valor ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Formato	
Dióxido de azufre	Anual	80	Media aritmética anual	Fluorescencia UV (método automático)
	24 horas	365	NE más de 1 vez al año	

\* NE: No debe exceder.

FUENTE: PCM. 2001.

Conforme a lo establecido en el Anexo I del presente Decreto Supremo, los nuevos Estándares de Calidad Ambiental establecidos para el Dióxido de Azufre entrarán en vigencia a partir del 1ro de enero del 2009. Como se observa en la Tabla 2, la normativa ya promulga una vigencia para cada ECA de  $\text{SO}_2$  atmosférico.

**Tabla 2: Estándar de Calidad Ambiental para el Dióxido de Azufre  $\text{SO}_2$ .**

Parámetro	Periodo	Valor $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Vigencia	Formato	Método de análisis
Dióxido de Azufre ( $\text{SO}_2$ )	24 horas	80	1 de Enero del 2009	Media aritmética	Fluorescencia UV (método automático)
	24 horas	20	1 de Enero del 2014		

FUENTE: MINAM. 2008.

Y mediante el Decreto Supremo 006-2013-MINAM, se aprueban las disposiciones complementarias para la aplicación del Estándar de Calidad Ambiental (ECA) para aire, donde principalmente se enfoca a la continuación del control y disminución de la contaminación atmosférica producido por el dióxido de azufre en las ciudades que presenten concentraciones menores a  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , y a la ejecución de acciones y metas dentro de sus planes de manejo a las ciudades que superen los  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , sujetándose a la normativa establecida para los límites del dióxido de azufre. Así mismo que el estándar de  $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$  se mantendrá vigente en las cuencas atmosféricas de Ilo, Arequipa y La Oroya (Resolución Ministerial 205-2013-MINAM), hasta que se culmine la implementación de sus Planes de acción. Por último, la ejecución de proyectos nuevos ya consideraran las concentraciones de los contaminantes del aire en sus instrumentos de gestión ambiental.

## **2.3. COMBUSTIBLES**

Fernández (2009), indica que el uso de combustibles fósiles también contribuye a la emisión de varias sustancias contaminantes, que incluyen diversos compuestos gaseosos con base de azufre y que, como ya se mencionó, los daños medioambientales provocados por estos son la lluvia ácida o el calentamiento global, cuyos efectos también se ven reflejados en la salud humana, en cuanto al aumento de los problemas respiratorios y cardiovasculares se refiere.

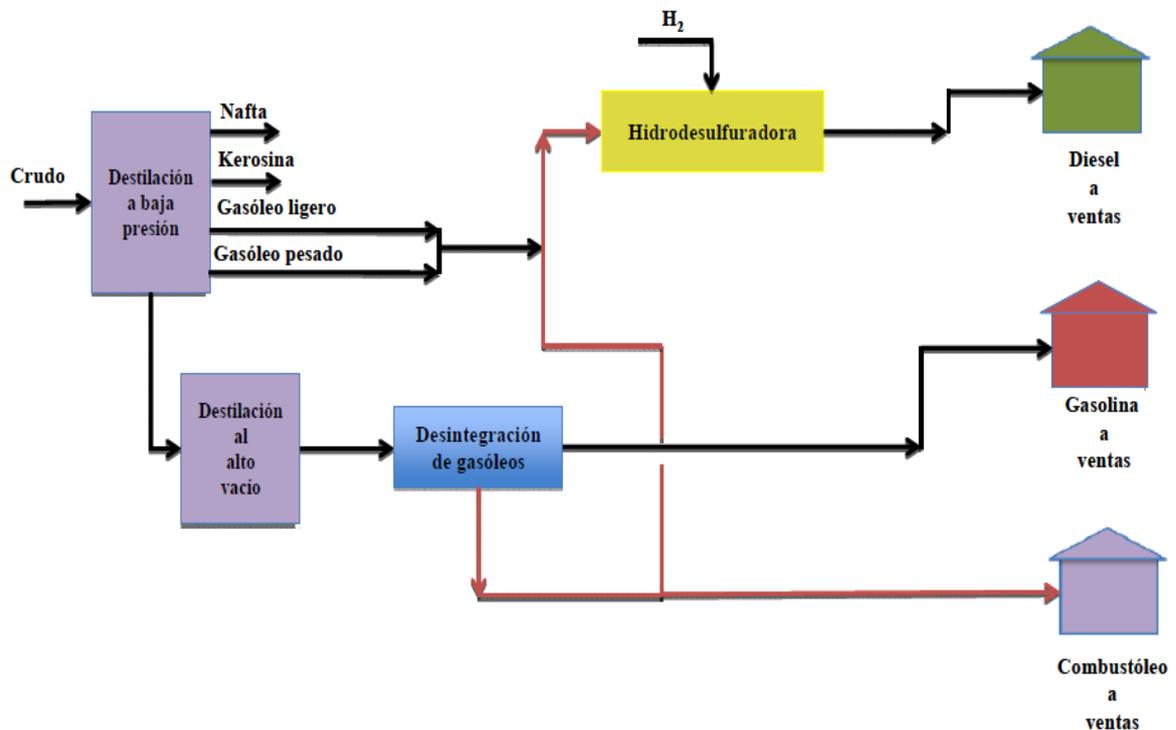
### **2.3.1. Combustibles y diésel**

El combustible diésel es una mezcla compleja de hidrocarburos cuyos grupos principales son las parafinas, los naftenos y los aromáticos. El azufre orgánico también es un componente natural y generalmente se emplean aditivos para influir en propiedades tales como las características de flujo, almacenamiento y combustión del combustible. Las propiedades reales del diésel comercial para vehículos dependen de las prácticas de refinación empleadas y de la naturaleza de los petróleos crudos a partir de los cuales se produce el combustible. La calidad y la composición del combustible diésel pueden influir significativamente en las emisiones de los motores diésel (Walsh 2008).

Castañeda, citado por Carbajal (2010), analizó el SO<sub>2</sub> atmosférico en el periodo de 1988 a 1995, para determinar qué medidas de mejora y cambio de combustibles tuvieron mayor impacto en la disminución del contaminante. Además utilizó la técnica de análisis de series de tiempo, específicamente el análisis de intervención y encontró que la concentración de SO<sub>2</sub> disminuyó hasta un valor base de 0.02 ppm, debido principalmente a la sustitución de combustóleo por gas natural y la introducción de diésel sin, que es un combustible distribuido y comercializado principalmente en la zona metropolitana de México, para uso industrial y transporte, aprobado por las autoridades.

El diésel fuel es un combustible compuesto de destilados obtenidos en la operación de refinado de petróleo o mezclas de tales destilados con aceite residual utilizados en automóviles. El punto de ebullición y el peso específico son más altos para los combustibles diésel que para la gasolina. Además a diferencia de las gasolinas, la autoignición es

importante en el diésel y el uso de cetano en este combustible es mayor para vehículos particulares que en camiones. En Perú, los sectores con un uso importante en sus actividades provienen de la generación eléctrica, en el transporte de carga pesada y en la minería. (U.S. Energy Information Administration, citado por Tamayo et al, 2015). El diagrama del proceso básico de producción de diésel se puede observar en la Figura 1.



**Figura 1: Diagrama típico en la producción de diésel.**

FUENTE: Rodríguez, 2012.

Respecto a la calidad del diésel producido como bien final en refinerías, dicho producto está en función de dos principales factores: la calidad del crudo procesado que se integra a todo el sistema de refinación y las características de diseño de la planta que eliminan el azufre contenido en el flujo de la materia prima.

Con el objeto de mejorar la calidad del diésel, uno de los procesos usados es el hidrotratamiento, un proceso que consiste en hacer pasar la carga sobre un catalizador en presencia de hidrógeno, logrando reducir el contenido de azufre, el contenido de nitrógeno, saturar olefinas y reducir aromáticos. (Poma, 2004)

Conforme a esto, se ha determinado diversos tipos de combustibles diésel (Hojas técnicas Petroperú):

- Diésel 2 (D2): Combustible derivado de la combinación compleja de hidrocarburos, destilado medio, obtenido de procesos de refinación.
- Diésel 2 S-50 (D2-S50): Combustible derivado de hidrocarburos, destilado medio, obtenido de procesos de refinación que presenta un contenido de azufre máximo de 50 partes por millón, para uso específico en vehículos con motores diésel que requieren un combustible con un contenido de hasta 50 mg/kg (ppm) azufre y número de cetano apropiado para uso vehicular.
- Diésel B2 (D B2): A partir del 01 de enero de 2009 se empieza a comercializar este combustible, el cual se compone de una mezcla de diésel N°2 y un 2% de Biodiesel B100.
- Diésel B2 S-50 (D B2-S50): Combustible constituido por una mezcla de diésel N°2 s50 y un 2% de biodiesel B100 y hasta un contenido de 50 ppm en azufre.
- Diésel B5 (D B5): A partir del 01 Enero 2011 se inició la comercialización de este combustible, en reemplazo del diésel B2. Este es un combustible constituido por una mezcla de diésel N°2 y 5% en volumen de Biodiesel (B100).
- Diésel B5 S-50 (D B5-S50): A partir del 01 Enero 2011 se inició la comercialización de este combustible, en reemplazo del diésel B2 S-50. Éste es un combustible constituido por una mezcla de diésel N°2 S-50 y se incrementa el porcentaje 2 a 5% en volumen de biodiesel (B100) y hasta un contenido de 50 ppm en azufre.

Es importante resaltar que, de conformidad a la legislación nacional vigente, se estableció un cronograma para el uso obligatorio de mezclas del diésel N°2 con el Biodiesel B100 (combustible diésel derivado de recursos renovables, que puede ser obtenido a partir de aceites vegetales o grasas animales. Además este combustible prácticamente no contiene azufre):

- Desde el 01 de enero de 2009: diésel B2 (mezcla de diésel N°2 y un 2% de biodiesel B100)
- Desde el 01 de enero de 2011: diésel B5 (mezcla de diésel N°2 y un 5% de biodiesel B100)

### 2.3.2. Azufre en los combustibles

Una consecuencia del consumo de combustibles son los problemas de contaminación atmosférica por la emisión de diversos compuestos, entre ellos el dióxido de azufre (GDF, citado por Nava et al. 2005).

La combustión del azufre produce dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ), un irritante ácido que también induce la lluvia ácida y la formación de material particulado sulfatado. El azufre es un componente natural del petróleo crudo y en consecuencia se encuentra tanto en la gasolina como en el diésel. Cuando estos combustibles son quemados, el azufre se emite como dióxido de azufre o como partículas de sulfatos. Cualquier reducción en el contenido de azufre en los combustibles disminuye las emisiones de estos compuestos y cuando este contenido disminuye más allá de cierto punto, el beneficio aumenta hasta una disminución importante de las emisiones totales de contaminantes (Walsh 2008 y Blumberg et al. 2003). Así mismo, Alfaro y Valle (2007) señalan la misma premisa, mencionada anteriormente, que el azufre como componente natural del petróleo crudo, se encontrará en la gasolina como en el diésel. El dióxido de azufre es considerado un contaminante que *pasa a través de* porque la cantidad de contaminante emitido al aire es casi la misma cantidad presente en el combustible, por lo cualquier reducción en el contenido de azufre en los combustibles disminuye las emisiones de estos compuestos.

Así mismo, Walsh (2008) sostiene que la contribución del azufre del combustible diésel a la emisión de partículas en los gases de escape ha quedado demostrada mediante una relación lineal general entre los niveles de azufre y esta emisión regulada. También hay una relación indirecta, ya que algunas emisiones de dióxido de azufre eventualmente se convertirán en la atmósfera en  $\text{PM}_{10}$  sulfatado. Además, Rodríguez (2012) sostiene que las acciones se han enfocado a reducir las emisiones de óxidos de azufre ( $\text{SO}_x$ ), óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ) y material particulado (PM). Para ello, en diversos países, se ha mejorado la calidad del combustible y se han incorporado inyectores electrónicos en los motores, cuyo diseño permite una mayor atomización del combustible en la cámara de combustión, lo que se traduce en una mezcla más homogénea de los contaminantes con el aire. También se han incorporado sistemas de control de emisiones (filtros de partículas y convertidores catalíticos, entre otros) y sistemas de control electrónico (como Electronic Control Module,

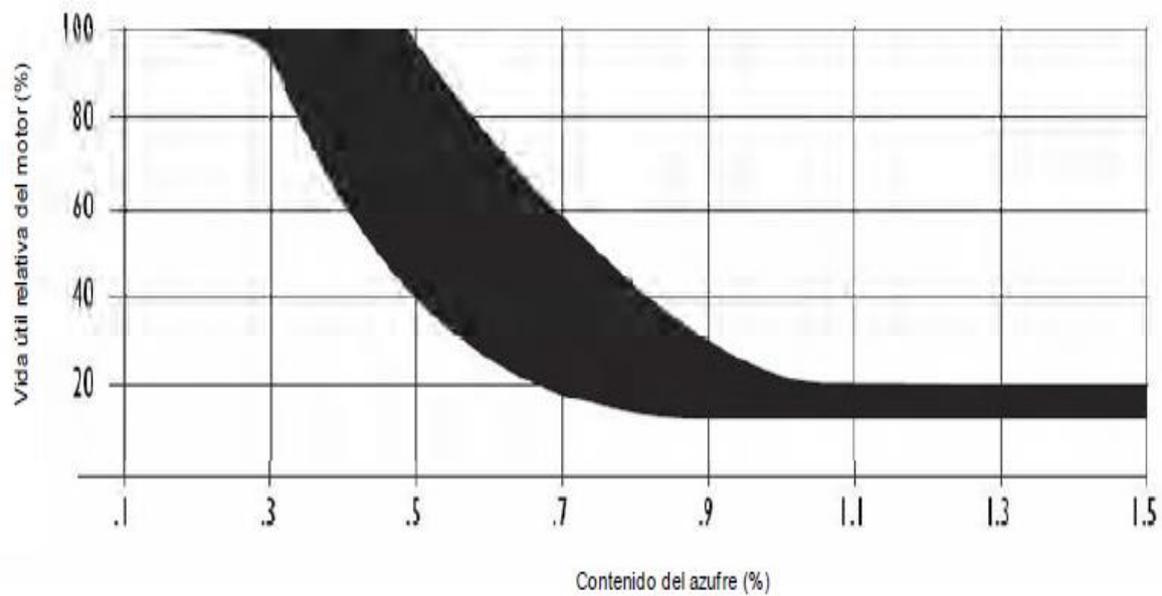
ECM, y Electronic Control Unit, ECU).

Como indican Nava et al. (2003), y Rodríguez (2012) el combustible, como la gasolina y el diésel, usado para el transporte es una de las principales fuentes de emisión de contaminantes y las estrategias orientadas a reducir su impacto en la atmósfera consisten en la disminución del azufre. Sostienen que las acciones más importantes para la reducción de SO<sub>2</sub> en la atmósfera son las siguientes: la reducción del contenido de azufre en las gasolinas y la introducción del Diésel Sin. Además las acciones más recientes son la reducción de azufre en el Pemex Diésel y la sustitución de gasóleo por Combustible Industrial. Enfatiza que aun cuando el consumo de petrolíferos aumentó, el aporte anual de azufre decreció. La introducción de combustibles más limpios y la adopción de normas y programas para el uso de vehículos más eficientes son las acciones más efectivas para enfrentar tales problemas.

La calidad del combustible que se usa en el sector transporte, y en cualquier otro sector, determina la calidad de los contaminantes que generan. Los combustibles “viejos”, como el carbono o los combustibles fósiles de baja calidad y altos contenidos de azufre, como el combustóleo o el diésel, generan niveles altos de azufre, humo negro y demás (Cruz, 2013).

La transición de combustibles, mediante la mejora tecnológica y la mayor infraestructura de Pemex para proporcionar combustibles más limpios, permitió que la Ciudad de México mejorara su calidad del aire y evolucionara la naturaleza de sus contaminantes. Sin embargo, en la actualidad, la falta de infraestructura tecnológica para la refinación y la gran demanda de combustible, ha ocasionado el regreso a los combustibles “sucios”, tales como el diésel con azufre en el transporte o el combustóleo en la industria. Aunado a lo anterior, la falta de capacidad institucional para el mantenimiento de la flotilla vehicular, la falta de recursos y la corrupción en la aplicación de la regulación ambiental, ha propiciado la circulación de una gran cantidad de vehículos viejos que consumen combustible sucio (Cruz, 2013).

Rodríguez (2005) sostiene que la mejora en la calidad del combustible, referido específicamente en la reducción del contenido de azufre, se verá reflejado en la vida útil del motor, donde una reducción de 5000 a 1000 ppm la aumentaría hasta un 60%. (Figura 2)



**Figura 2: Efecto del Azufre en la vida útil del motor.**

FUENTE: PNUMA, citado por Rodríguez, 2012.

Además Cruz (2013) sostiene que el 95% del combustible líquido se utiliza directamente en el sector transporte a escala mundial (Kahn-Riveiro, citado por Cruz, 2013). La combustión de los diversos tipos de combustible que se usan en el sector transporte genera varios tipos de contaminantes. Los factores físicos y meteorológicos, como la altitud y la temperatura del medio ambiente, y otros como el estado mecánico del vehículo, su tecnología, su forma de manejo y de mantenimiento, determinarán las emisiones que se generarán durante su operación. Los combustibles, por su parte, determinan el tipo de contaminantes que se emitirán a la atmósfera. La contaminación, por tanto, tiene su base en la historia de los combustibles y las tecnologías vehiculares.

Blumberg et. al (2003) señalan que los combustibles pueden ser clasificados según su contenido de azufre:

- Los combustibles pobres en azufre (~150 ppm) hacen a los vehículos existentes más limpios. Estos combustibles reducen las emisiones de CO, HC, y NO<sub>x</sub> de los vehículos a gasolina equipados con catalizadores, y las emisiones de PM de vehículos a diésel, con o sin catalizadores de oxidación.
- Los combustibles de bajo azufre (~50 ppm) permiten mayores beneficios al incorporar tecnologías avanzadas de control para vehículos diésel. Los filtros de partículas del diésel pueden usarse con combustibles de bajo azufre pero sólo alcanzan un 50% de

eficiencia de control, aproximadamente. La reducción catalítica selectiva puede aplicarse en este caso para lograr un control de emisiones de NO<sub>x</sub> superior al 80%.

- Combustibles de ultra bajo azufre (~10 ppm) permiten el uso de equipo de absorción de NO<sub>x</sub>, incrementando su control hasta niveles superiores al 90%, tanto en vehículos a diésel como de gasolina. Esto permite diseños de motores más eficientes, que son incompatibles con los actuales sistemas de control de emisiones. Los filtros de partículas alcanzan su máxima eficiencia con combustibles de ultra bajo azufre, cerca del 100% de reducción de PM.

Respecto a su evaluación y medición realizado en algunas estaciones de combustible en Lima, es mediante el uso de un equipo automático determinador de azufre, que es un espectrómetro que utiliza la tecnología Fluorescencia de Rayos X por Energía Dispersiva.

Así, se mide las concentraciones de azufre a nivel de ppm en el petróleo crudo y productos petrolíferos líquidos como gasolina, diésel, kerosene, fuel-oil, heating oil y residual fuel oil. Dicho procedimiento cumple con la norma ASTM D 4294.

REFERENCIA: Método ASTM D 4294. “Standar test method for sulfur in petroleum products by energy dispersive x-ray fluorescence spectrometry”, que forma parte del listado de métodos de ensayo aprobados en el Perú para este tipo de análisis, según la NTP 321.003.

### **2.3.3. Situación actual de los combustibles**

La reformulación de combustibles convencionales y las modificaciones que se puedan hacer a sus constituyentes, pueden tener efectos rápidos y un impacto muy significativo en el caso de los vehículos que ya están circulando. Para el caso de los combustibles diésel, un punto muy importante para la reducción de la contaminación, será la reducción del contenido de azufre (Walsh y Kolke, 2003).

Una reducción en la contaminación del aire debería integrar mejoras, tanto a nivel en modificación de los vehículos, como en la formulación de los combustibles que utilicen. Centrarse en un solo aspecto, focalizándose solamente en los combustibles o el diseño de un programa en mejora de la calidad de los combustibles, no tendrá un impacto significativo en

la reducción de la contaminación, y por ende estará condenada al fracaso. (Walsh 2008).

Casi en cualquier rincón del mundo, para cada tipo de vehículo y su correspondiente combustible hay una clara tendencia hacia exigencias cada vez más rigurosas sobre emisiones. Varios factores impulsan estas tendencias:

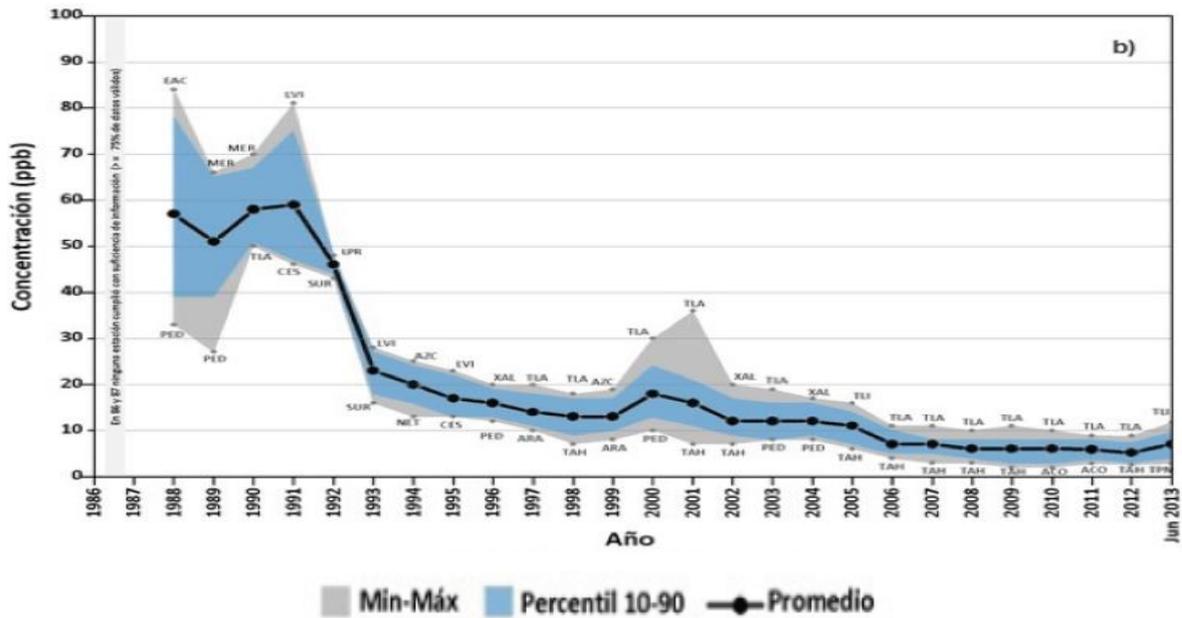
- a. Crecimiento continuo de la cantidad de vehículos y su concentración en áreas urbanas donde los niveles de contaminación siguen siendo elevados;
- b. Creciente acumulación de estudios de salud que muestran efectos adversos a niveles más y más bajos de contaminación, y en el caso de MP, virtualmente a cualquier nivel;
- c. Avances en la tecnología vehicular y combustibles limpios, lo cual está haciendo posible lograr niveles de emisión cada vez más bajos.

Un punto importante en la actualidad, es que los vehículos limpios y los combustibles de alta calidad van de la mano, por lo que deben tratarse como un sistema; los diésel reformulados pueden reducir las emisiones de partículas de todos los vehículos diésel. Los combustibles con índices especialmente bajos de azufre reducen el aporte de sulfatos. (Walsh, 2008)

Cruz (2013) señala que en los años preindustriales, y hasta mediados del siglo XX, los contaminantes emitidos por el sector transporte estaban identificados en el humo. Los primeros monitores ambientales consistían en filtros en los que las tonalidades de negro daban la indicación de la gravedad de la contaminación. La llegada de los combustibles más refinados, como las gasolinas, trajo consigo un aumento de plomo en la concentración atmosférica y en la sangre de los habitantes. El advenimiento de los combustibles bajos en azufre disminuyó paulatinamente los niveles de dióxido de azufre en el aire. Además de que la reducción de plomo en las gasolinas, a partir la segunda mitad de la década de 1980, permitió iniciar el descenso de este contaminante en el aire.

Para el caso de México (Figura 3), las reducciones de azufre en los combustibles se realizaron en varias etapas, principalmente al inicio de los años 1990 como parte de las medidas del PICCA. Sin embargo, los altos niveles de azufre en el diésel han sido disminuidos con la publicación de la norma oficial mexicana que regula los niveles de este contaminante en el diésel. Pemex, al no tener infraestructura para producir y surtir diésel

ultra bajo en azufre, ha tenido que comprar en refinerías de Estados Unidos dicho producto.



**Figura 3: Reducción del contenido de azufre en los combustibles, México.**

FUENTE: Cruz, 2013.

### 2.3.4. Marco legal

Del documento donde se Aprueba el Cronograma de Reducción Progresiva del Contenido de Azufre en el Combustible Diésel N° 1 y 2, el Decreto Supremo N° 025-2005-EM, publicado el 14 de octubre del 2005, donde el artículo 1°, sobre la aprobación del Cronograma de reducción progresiva del contenido de Azufre en el Combustible Diésel N° 1 y Diésel N° 2, se plantea el cronograma referido en la Tabla 3:

**Tabla 3: Cronograma de reducción progresiva del contenido de Azufre en el Combustible**

Año	60 días calendario posteriores a la vigencia de la presente norma			1 de Enero de 2010
	Diésel N° 1	Diésel N° 2	Diésel N° 2 Especial	
Máximo azufre total, % Masa	0.3	0.5	0.05	0.005

FUENTE: Ministerio de Energía y Minas, 2005.

Donde el artículo 2°, señala la Prohibición a partir de los 60 días naturales de vigencia de la presente norma (14 de diciembre del 2005) la importación de Combustibles Diésel N° 1 y Diésel N° 2 con niveles de concentración de Azufre superiores a 2500 ppm (máximo azufre total % masa 0, 25). Y cuyas consideraciones mencionan:

- Las limitaciones de productos contaminantes en los combustibles tienen por objetivo la protección de la salud de la población.
- El artículo 2 del Decreto Supremo N° 012-2005-PCM (Dejan en suspenso la aplicación del acápite II del Anexo N°1 del DS N° 047-2001-MTC), ha dispuesto que el Ministerio de Energía y Minas apruebe un cronograma de reducción del contenido de azufre en los combustibles diésel y que sea compatible con las normas establecidas para los vehículos nuevos contenidas en el Decreto Supremo N° 047-2001-MTC; debiendo considerar una meta final de trescientas cincuenta (350) a cincuenta (50) partes por millón de azufre (ppm) como valor máximo de contenido de dicho elemento en el referido combustible y conferir carácter vinculante a las Normas Técnicas Peruanas correspondientes.
- Las elevadas concentraciones de azufre en el diésel, contribuyen en alto grado en la polución de los centros urbanos y se torna necesario aprobar un cronograma progresivo de reducción del contenido del Azufre que permita la mejora en la calidad de los combustibles y la alineación del país respecto de los estándares ambientales internacionales, y que para su efecto es necesario tomar en consideración que el establecimiento de un cronograma de reducción progresiva del contenido de Azufre en el combustible Diésel N°. 1 y 2 no sólo involucra la fijación de estándares ambientales más exigentes, sino cumplir con la obligación de garantizar el abastecimiento de combustibles a todo el país, lo que a su vez tomará en consideración el hecho que los operadores y/o propietarios de las Refinerías del país deben formular programas de adaptación en sus instalaciones a las nuevas exigencias técnicas y ambientales y que para ello deben efectuarse los estudios de mercado, de procesos e ingeniería y posteriormente llevar a cabo las inversiones suficientes para permitir la ejecución de tales programas.
- Se ha considerado necesario prohibir la importación de Diésel N° 1 y Diésel N° 2 con niveles de concentración de Azufre Superiores a dos mil quinientos partes por millón (2

500 ppm), a fin de promover una oferta de mejor calidad de dicho combustible.

Además, dicho Decreto Supremo 025-20015-EM, tiene una modificatoria, la cual está dada por el Decreto Supremo 041-2005-EM, con fecha de publicación del 7 de octubre del 2005, la cual, sin embargo no modifica las características para el contenido de azufre en los combustibles, pero que decreta:

Artículo 1°. De la modificación del artículo 4° del Decreto Supremo N° 025-2005-EM, por el texto siguiente: "Artículo 40. Sobre las Especificaciones aplicables al Diésel N° 1, Diésel N° 2 Y Diésel N° 2 Especial, a partir de 60 días de la vigencia del presente Decreto Supremo resultaran de aplicación para los combustibles Diésel N° 1, Diésel N° 2 y Diésel N° 2 Especial las siguientes especificaciones...".

Así mismo, dicho decreto 041-2005-EM, posee una modificatoria más, la cual es el decreto supremo 092-2009-EM, que menciona:

- Que, la Norma Técnica Peruana - NTP 321.003:2005 establece las especificaciones para el diésel N° 1, diésel N° 2 (D2 S-350) y diésel N° 2 (D2 S-50). Sin embargo, la Dirección General de Hidrocarburos del Ministerio de Energía y Minas ha recomendado establecer nuevas especificaciones para el Diésel N° 2 (D2 S-50) a comercializarse a partir del 01 de enero de 2010 en las provincias de Lima y Callao, considerando las condiciones actuales donde se desarrollaría el mercado del referido combustible. De la misma manera, también ha recomendado la modificación de las especificaciones aplicables al producto Diésel B2, siendo necesario modificar el artículo 4 del Decreto Supremo N° 041-2005-EM, con la finalidad de establecer nuevas especificaciones para el producto Diésel B2, a fin de poder cumplir con lo señalado en el Decreto Supremo N° 061-2009-EM (criterios para la autorización de la venta de combustibles con un contenido de azufre mayor a 50 ppm).
- Que, de otro lado, el Diésel B2 con contenido máximo de 50 ppm de azufre, será introducido para su comercialización en la provincia de Lima y en la Provincia Constitucional del Callao a partir del 01 de enero de 2010, por lo que se requiere de un periodo de transición en el cumplimiento de las especificaciones de calidad de dicho producto en los Terminales, Plantas de Abastecimiento y los Establecimientos de Venta al Público, en tanto existan remanentes de Diésel B2 con alto contenido de azufre, en

los tanques de almacenamiento, considerando que hasta el 31 de diciembre de 2009 se puede comercializar Diésel B2 hasta con un contenido de azufre de 5000 ppm;

Y resuelve:

Artículo 1.- Modificación del artículo 4 del Decreto Supremo N° 041-2005-EM, de acuerdo al texto siguiente: Artículo 4.- De la puesta en vigencia de especificaciones técnicas: A partir del 1 de enero del año 2010, resultarán de aplicación en la zona o zonas en donde sea obligatorio el uso del Diésel B2 (DB2 S-50) las siguientes especificaciones: **Azufre total, mg/kg (ppm): 50**

Artículo 2.- Establecer un período de transición de 60 días calendario, a partir del 01 de enero de 2010 (hasta 1ro de marzo del 2010), para que el diésel B2 que se comercialice en la provincia de Lima y Provincia Constitucional del Callao alcance el nivel de contenido de azufre permitido.

En resumen, las normativas relacionadas a la calidad de los combustibles y otras que derivaron a la formulación y promulgación de las anteriores, en específico al combustible diésel en la ciudad de Lima y Callao:

- Decreto Supremo 047-2001-MTC, promulgado el 31 de octubre de 2001, donde se establecen límites máximos permisibles de emisiones contaminantes para vehículos automotores que circulen en la red vial, y donde menciona que el inadecuado mantenimiento de los vehículos automotores por una falta de control y crecimiento del parque automotor, en los últimos años, ha generado un incremento de la contaminación ambiental producidos por el funcionamiento de los motores de dichos vehículos, en especial en las zonas urbanas, derivando de esta situación efectos nocivos para la salud de las personas...
- Ley 28054, promulgada el 7 de agosto del 2003, y donde se establece el marco general para promover el desarrollo del mercado de los biocombustibles y donde toma como un hito importante la disminución de la contaminación ambiental.
- Decreto Supremo 012-2005-PCM, promulgado el 15 de febrero de 2005, donde sus considerandos mencionan que el Anexo N° 1 del Decreto Supremo N° 047-2001-MTC

contiene en su acápite I los valores de los "Límites Máximos Permisibles para vehículos en circulación a nivel nacional" y en su acápite II los valores de los "Límites Máximos Permisibles para vehículos nuevos que se incorporen (importados o producidos) a nuestro parque automotor"; que los vehículos automotores nuevos a ser importados o producidos en el país que funcionen a motor Diésel, requieren del suministro de un determinado tipo de combustible y que la calidad o nivel de especificaciones del Diésel de uso automotor disponible en ese momento no guardaba relación con la calidad adecuada y requerida por los vehículos nuevos, lo que constituía un inconveniente para la aplicación de los límites máximos permisibles exigidos; es por eso que resulta necesario dejar en suspenso la aplicación del acápite II; asimismo, era pertinente que el Ministerio de Energía y Minas proponga un cronograma de reducción y retiro del azufre en el combustible Diésel automotor apuntando a una meta final de un Diésel con mínimo de azufre, confiriendo para ello, carácter vinculante a las versiones vigentes de las Normas Técnicas Peruanas - NTP correspondientes; por tanto, en su artículo 1, menciona dejar en suspenso hasta el 31 de diciembre de 2005 la aplicación del acápite II del Anexo N° 1 del Decreto Supremo N° 047-2001-MTC; además indica en su artículo 2 que el Ministerio de Energía y Minas en el plazo de cuarenta y cinco (45) días calendario, aprobará un cronograma de retiro del azufre en el combustible diésel de uso automotor, que sea compatible con las normas establecidas para los vehículos nuevos contenida en el Decreto Supremo N° 047-2001-MTC, y que deberá considerar: Una meta final de 50 a 350 ppm como rango máximo de contenido de azufre en el diésel y conferir carácter vinculante las Normas Técnicas Peruanas correspondientes.

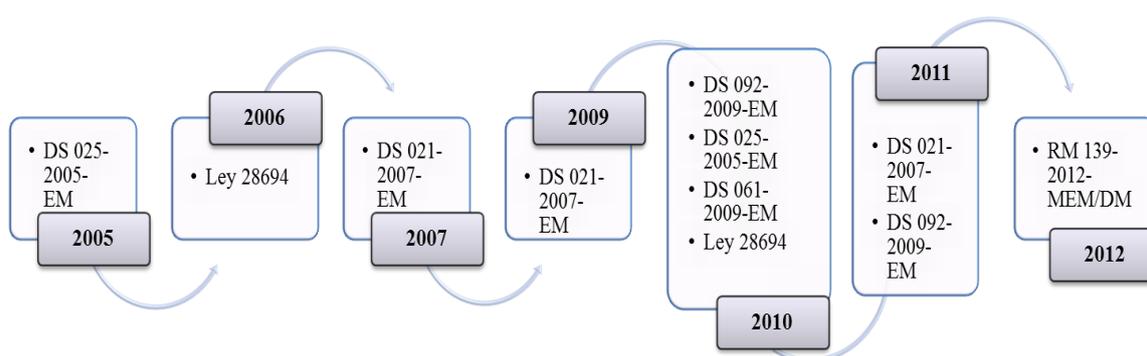
- Decreto Supremo 025-2005-EM, promulgado el 6 de julio de 2005, cuyo artículo 1 menciona la aprobación del cronograma de reducción progresiva del contenido de azufre en el combustible diésel N° 1 y N° 2: Diésel 1, 3000 ppm a partir de setiembre de 2005; diésel 2, 5000 ppm a partir de setiembre de 2005 y diésel 2 especial, 500 ppm, así como a partir del 1 de enero del 2010 se deberá tener un contenido de azufre máximo de 50 ppm; en su artículo 2 sobre la prohibición de importación de combustibles diésel N° 1 y N° 2 con niveles de concentración de azufre superiores a 2500 ppm, a partir de los 60 días naturales de la vigencia de esta norma; en el artículo 3 señala la posibilidad de oferta de combustibles con menor cantidad de azufre y por último en su artículo 4 señala las especificaciones aplicables al diésel N° 1, diésel N° 2 y diésel N° 2 especial.

- Decreto Supremo 041-2005-EM, promulgado el 7 de octubre de 2005, y que modifica el Decreto Supremo 025-2005-EM y donde añade precisiones para una mayor coherencia técnica al cronograma aprobado y facilitar su fiscalización. Por tanto en su artículo 1 modifica el art 4 del DS 025-2005-EM, pero no indica variaciones respecto al contenido de azufre.
  
- Ley 28964, promulgada el 20 de marzo de 2006, donde según su artículo 2, indica que a partir del 1 enero 2010 queda prohibida la comercialización para el consumo interno de combustible diésel cuyo contenido de azufre sea superior a las 50 ppm; en su artículo 3, indica sobre la implementación de medidas tributarias de promoción de combustibles limpios y en su artículo 4, a partir de la vigencia de la presente ley, queda prohibida la importación de combustibles diésel N°1 y N°2 con niveles de concentración de azufre superiores a 2500 ppm y la venta para el mercado interno de diésel con contenido de azufre mayor a 5000 ppm. Además posee una disposición transitoria, la cual menciona que en un plazo no mayor a 90 días será aprobado el reglamento de dicha ley.
  
- Decreto supremo 021-2007-EM, 20 de abril de 2007, y sus distintas modificatorias; donde su artículo 1 indica la aprobación del reglamento para la comercialización de biocombustibles; brinda disposiciones generales, de la comercialización y control de calidad de los biocombustibles y las mezclas con combustibles líquidos derivados de los hidrocarburos tales como gasolinas y diésel N° 2. En su artículo 10 indica un cronograma de comercialización, donde se dispone:
  - A partir de la vigencia del reglamento, el B100 y el diésel B20 podrán ser comercializados por distribuidores mayoristas solo a consumidores directos autorizados...
  - A partir de la vigencia del reglamento se podrá comercializar en todo el país el diésel B2.
  - A partir del 1 de enero de 2009, la comercialización de diésel B2 será obligatoria en todo el país, en reemplazo del diésel 2.
  - A partir del 1 de enero de 2011 la comercialización de diésel B5 será obligatoria en todo el país, en reemplazo del diésel B2.

- Resolución Ministerial 165-2008-MEM/DM, promulgada el 7 de abril de 2008, menciona sobre las disposiciones relativas a la calidad y métodos de ensayo para medir las propiedades de los combustibles diésel B2, diésel B5 y diésel B20, donde su artículo 1 establece que la calidad de los combustibles diésel B2, B5 y B20, cumplan con la especificación del diésel 2 aprobada por DS 025-2005-EM y sus modificatorias, además que el organismo competente realizará auditorías a fin de verificar el balance volumétrico entre B100 y mezclas de diésel BX; y en cuyo artículo 2 establece métodos de ensayo para la medición de propiedades de diésel B2, B5 y B20, que sean aplicables al Diésel 2, como aprueba el DS 025-2005-EM.
  
- Decreto Supremo 092-2009-EM, promulgado el 30 de diciembre de 2009, en donde su artículo modifica el artículo 4 del Decreto Supremo 041-2005-EM, y que indica que a partir del 1 de enero del año 2010, resultarán de aplicación en la zona o zonas en donde sea obligatorio el uso de diésel B2 (DB2-s50), las siguientes especificaciones:
  - Azufre total (mg/kg, ppm): 50
  - Biodiesel 100 (B100): Contenido, % vol: 2 (a partir del 1 de enero del 2011 el contenido de B100 será de 5% en volumen)
 Mientras que su artículo 2 menciona sobre el periodo de transición de 60 días calendario a partir del 1 de enero del 2010 para que el diésel B2 se comercialice en la provincia de Lima y Callao.
  
- Decreto Supremo 061-2009-EM, promulgado el 4 de setiembre de 2009, que resuelve en su artículo 1, decretar los criterios para determinar zonas geográfica donde se autorice la venta de diésel con azufre mayor a 50 ppm, entre los cuales figuran la concentración o densidad poblacional, niveles de contaminación del aire, volumen del parque automotor y el volumen de consumo de diésel; a su vez, en su artículo 2 menciona sobre la prohibición de comercializar y usar diésel B2 con contenido de azufre mayor de 50 ppm en las provincias de Lima y Callao, a partir del 1 de enero del 2010. También queda prohibido el uso de diésel B2 con un contenido de azufre mayor a 50 ppm por parte de los consumidores directos, que lo usen como combustible automotriz, en Lima y Callao.

- Resolución Ministerial 139-2012-MEM/DM, promulgada el 16 de marzo de 2012, donde su artículo único indica la prohibición de comercializar y usar diésel B5 con un contenido de azufre mayor a 50 ppm en los departamentos de Lima, Arequipa, Cusco, Puno, Madre de Dios y en la provincia constitucional del Callao, en un plazo máximo de 120 días calendario a partir de la publicación de la presente resolución. En ese plazo, el diésel B5 que se comercialice debe alcanzar el nivel de azufre permitido.

Todas las normativas antes mencionadas fueron promulgadas en diferentes fechas, las cuales se grafican en una línea de tiempo, como se puede observar en la figura 4.



**Figura 4: Entrada en vigencia de las normativas referentes al contenido de azufre en los combustibles diésel.**

FUENTE: Elaboración propia.

El cuadro resumen de las normativas promulgadas y relacionadas al contenido de azufre en los combustibles diésel se puede observar en el Anexo 5.

## 2.4. SITUACIÓN EN LIMA METROPOLITANA Y CALLAO

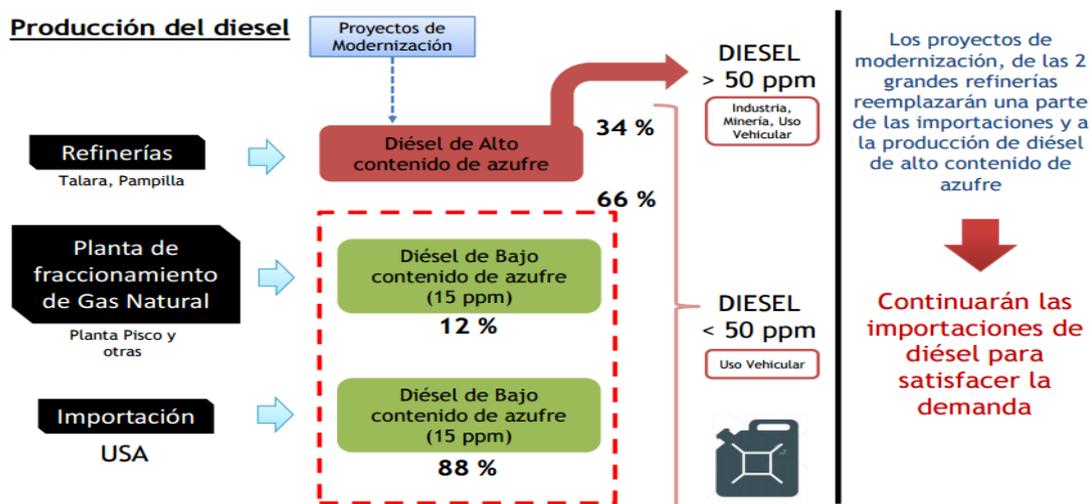
### 2.4.1. Comportamiento del combustible en la ciudad de Lima

Por lo señalado por el OSINERGMIN (2015), Perú es un país importador neto de hidrocarburos derivados del petróleo y según datos del MEM, el diésel fue el combustible de mayor uso a nivel nacional y es el de mayor importancia en el sector transporte y minero,

además el tercero en el sector industrial. Respecto a la fiscalización respecto a La calidad se ha ejercido la supervisión de la calidad del diésel, para verificar si se cumple con las especificaciones técnicas, como que el contenido de azufre no supere las 50 partes por millón (ppm) en un galón de diésel. Entre 2005 y 2010 la supervisión se realizó de manera censal, visitando a todos los establecimientos autorizados para el expendio de gasolinas, pero solo una vez al año. Esta estrategia tenía la debilidad de que los EE.SS, una vez supervisados, podían relajar su cumplimiento de las normas. Luego en 2011 se cambió a una supervisión muestral con reemplazo, que era tres veces al año. Bajo este método de muestreo, cada EE.SS. tenía la misma probabilidad de ser seleccionada en cada supervisión y podía llegar a ser supervisado tres veces al año, aunque con una probabilidad muy baja.

Respecto a la modernización de las refinerías, en el caso de Talara, es el principal proyecto en ejecución junto con el Gasoducto Sur Peruano. Este permitirá procesar crudos pesados y cumplir con las especificaciones de azufre, entre otras mejoras, lo cual no solo reducirá la importación del combustible bajo en azufre, sino que permitiría ampliar la vigencia del estándar a otras regiones del país y reducir aún más la emisión de gases contaminantes a la atmósfera, beneficiando la salud de la ciudadanía. En cuanto a La Pampilla, se plantea la reducción de azufre en los combustibles procesados mediante una planta de hidrotreatmento de diésel N° 2, una de hidrotreatmento de gasolinas (segunda etapa del proyecto) y una de generación de hidrógeno, para el mejoramiento de la calidad de los combustibles y destinadas a las mismas ventajas como la mejora de Talara.

Como se puede observar en la figura 5, la producción de los combustibles diésel que se maneja en Perú, viene dado en un mayor porcentaje por la importación de dicho combustible, y donde los proyecto a futuro de modernización, tienen como meta reducir dicha importación, satisfacer la demanda interna y procesar combustibles de mejor calidad.



**Figura 5: Comportamiento del combustible diésel en Lima.**

FUENTE: Gas Energy Latin American, 2016.

Por otra parte, como indica Gas Energy, en su matriz realizada de los combustibles del Perú, en la evolución de la matriz energética del sector transporte, el diésel muestra un gran predominio sobre los otros combustibles, es así que la mayor parte de la demanda de diésel se centra en este sector. De ello, los porcentajes de participación para los combustibles diésel, para el periodo 2011 al 2013, se muestra en la tabla 4:

**Tabla 4: Porcentaje de consumo de combustible diésel respecto al uso automotriz**

Mes	Porcentaje	Mes	Porcentaje	Mes	Porcentaje
ene-11	0.703	ene-12	0.667	ene-13	0.644
feb-11	0.711	feb-12	0.69	feb-13	0.695
mar-11	0.703	mar-12	0.693	mar-13	0.695
abr-11	0.645	abr-12	0.684	abr-13	0.699
may-11	0.657	may-12	0.658	may-13	0.669
jun-11	0.682	jun-12	0.667	jun-13	0.666
jul-11	0.7	jul-12	0.692	jul-13	0.7
ago-11	0.703	ago-12	0.693	ago-13	0.722
sep-11	0.699	sep-12	0.705	sep-13	0.721
oct-11	0.701	oct-12	0.709	oct-13	0.714
nov-11	0.682	nov-12	0.69	nov-13	0.685
dic-11	0.679	dic-12	0.684	dic-13	0.695

FUENTE: Elaboración propia, con los registros de OSINERGMIN, 2013.

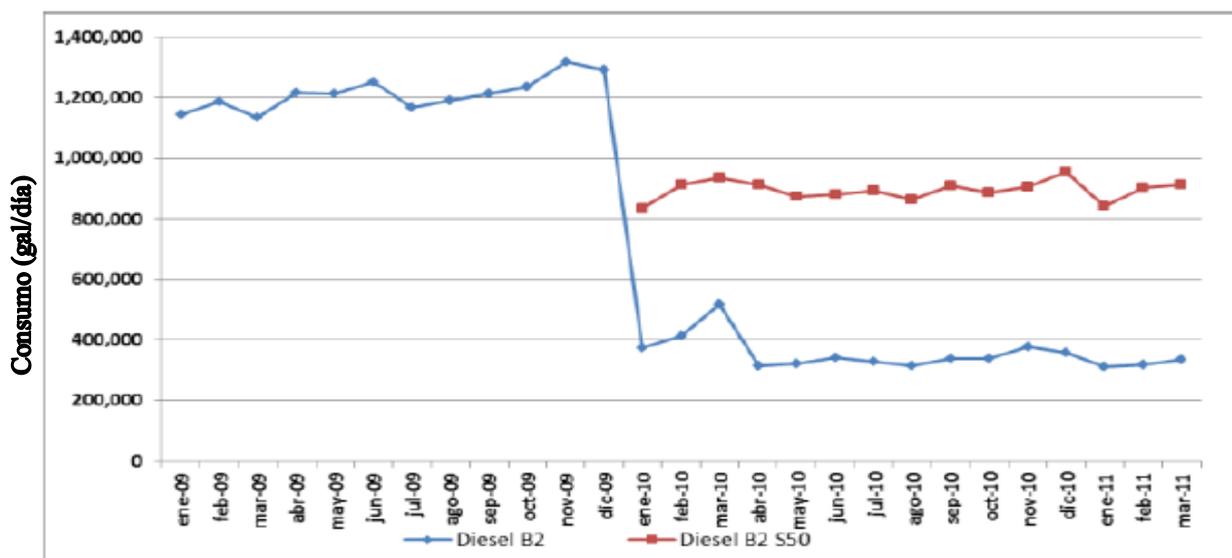
De la tabla anterior, se desprende que aproximadamente un 70% del combustible diésel consumido en Lima es destinado a los servicios de transporte y parque automotor, un 9% a los distribuidores minoristas, que distribuyen a los rubros de industrias, manufacturas, construcción, agricultura y otras actividades económicas, y un 21% a los consumidores directos, principalmente relacionado a la generación eléctrica (Luz del Sur y Edelnor son los principales distribuidores de energía eléctrica a la ciudad de Lima, MEM, 2014).

Así mismo, se afirma que la sustitución de la venta de un diésel con contenido de azufre de 5000 partes por millón (ppm) por otro de 50 ppm, ha permitido que diariamente se evite la emisión de aproximadamente 27 ton de dióxido de azufre, como se observa en la Figura 6 y la Tabla 5. (Comité de Gestión: Iniciativa Aire Limpio, Lima – Callao, PE, 2010).

**Tabla 5: Consumo de combustible diésel de Enero 2009 a Marzo 2011 (gal/día)**

Mes	Diésel B2	Diésel B2 S50
Ene-09	1 144 243	
Feb-09	1 186 205	
Mar-09	1 135 452	
Abr-09	1 217 503	
May-09	1 213 861	
Jun-09	1 253 918	
Jul-09	1 167 539	
Ago-09	1 190 623	
Sep-09	1 212 302	
Oct-09	1 236 165	
Nov-09	1 317 502	
Dic-09	1 292 060	
Ene-10	375 213	833 209
Feb-10	412 765	914 507
Mar-10	517 444	936 130
Abr-10	316 101	913 980
May-10	323 748	873 419
Jun-10	343 298	880 368
Jul-10	327 475	893 428
Ago-10	316 607	865 557
Sep-10	337 793	909 786
Oct-10	337 310	885 723
Nov-10	378 154	906 559
Dic-10	357 927	955 448
Ene-11	310 747	839 719
Feb-11	319 373	904 257
Mar-11	335 359	913 808

FUENTE: OSINERGMIN, 2010.



**Figura 6: Consumo de combustible diésel de Enero 2009 a Marzo 2011 (gal/día)**

FUENTE: OSINERGMIN, 2010.

Respecto a la calidad de los combustibles diésel utilizados en Lima Metropolitana y Callao, según lo que indica la Asociación de Representantes Automotrices del Perú (2014), los combustibles comercializados cumplen los valores establecidos, que existen diferencias significativas en cuanto a calidad de los productos de las refinerías pero que se tiene una calidad más estándar respecto a las importadas, y por último, que el mercado local se encuentra en déficit en cuanto a diésel, por lo que se recurre a las importaciones de diésel de bajo azufre. Además la comercialización de combustibles se ve diferenciado en ciertas regiones del país.

Como indica ARAPER (2014) y su asociación con REPSOL (2016), en un informe de la evolución y tendencias de la calidad de los combustibles, los combustibles distribuidos en Lima tienen un contenido menor a 50 ppm en azufre (en cumplimiento con las normativas implementadas), así como otros 7 departamentos, mientras que los demás aún se mantiene la comercialización de combustibles con un contenido de azufre mayor a 5000 ppm. Sin embargo, ocurren ciertos incumplimientos, que responden factores como los volúmenes de consumo de diésel, alta densidad poblacional y volumen del parque automotor. Así mismo, se indica un retraso en la aplicación de la norma Euro IV, que entrará en vigencia a partir del 31 de diciembre del 2017.

Respecto al consumo en el país, para el 2016 se tiene un 62% de diésel de bajo azufre importado, mientras que un 38% como diésel de alto azufre nacional. Así mismo, los combustibles diésel comercializados se conforman de la siguiente manera:

- Diésel 2, distribuido desde el año 2005 hasta fines del 2008. El contenido de azufre en este combustible alcanzaba valores de 4800 ppm. Posterior a ello se introdujo diésel 2 con contenido de azufre menor a 50 ppm, el cual fue mezclado con los biodiésel para su comercialización.
- Diésel b2, distribuido desde el año 2009 hasta fines del 2010. Este combustible es la mezcla del diésel 2 con un 2% de biodiésel lo que diluye el contenido de azufre en este combustible aunque en algunos puntos se alcanzaron valores hasta 3000 ppm en contenido de azufre y un promedio de 1000 ppm.
- Diésel b5, distribuido desde el año 2011 hasta fines del 2013. Este combustible es la mezcla del diésel 2 (con un contenido de azufre menor a 50 ppm) con un 5% de biodiésel. El contenido de azufre en este combustible alcanzó valores de hasta 80 ppm y un promedio de 40 ppm.

#### **2.4.2. Fuentes Naturales**

El estudio del Comité de Gestión: Iniciativa de Aire Limpio (2010), señala que el clima del Área Metropolitana Lima-Callao se caracteriza por ser desértico, de suelo con textura ligera a fina y con poca cobertura vegetal, lo cual permite que la acción de los vientos provenientes del Sur arrastre partículas de origen natural hacia las zonas centro, este y norte de la ciudad.

#### **2.4.3. Calidad del Aire y Análisis de su Evolución en Lima-Callao**

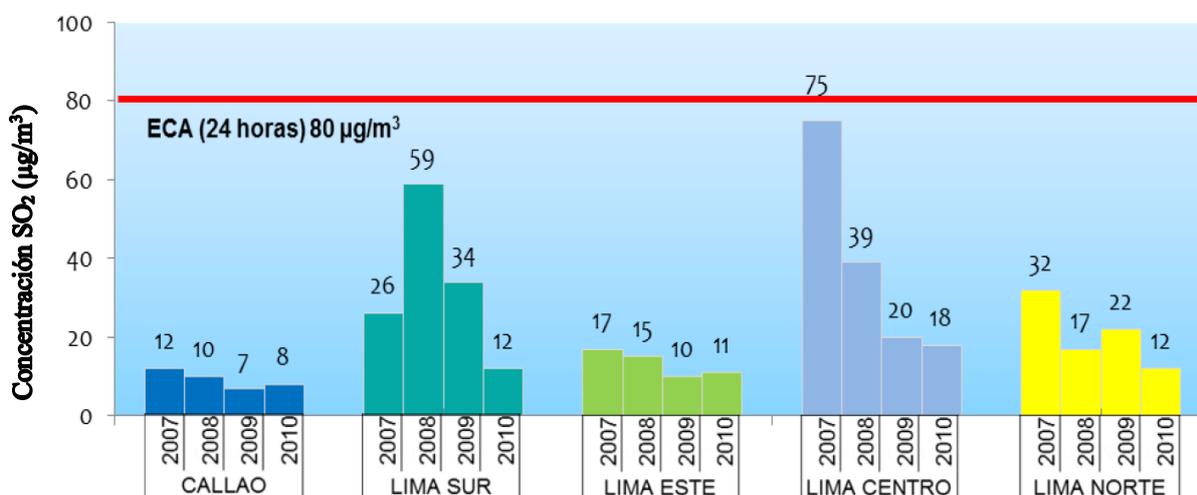
En cuanto a la contaminación atmosférica en el Área Metropolitana, ha venido mejorando en los últimos 5 años, debido a las diversas medidas implementadas, sin embargo aún existen factores que vienen generando contaminación, tales como la deficiente planificación urbana y su movilidad, el crecimiento del parque automotor y su falta de mantenimiento, lo que suma la importación de vehículos usados; también la mala gestión en la ubicación de industrias y comercio, tecnologías obsoletas, baja eficiencia, etc. Todas estas condiciones hacen que los contaminantes atmosféricos eleven sus concentraciones y afecten la salud de

la población.

El principal factor atribuido a la contaminación del aire en Lima es la dinámica de la población y las actividades que desarrolla, que acrecienta sus efectos en puntos urbanos con gran cantidad de habitantes, donde las principales actividades provienen de la producción de bienes y servicios que se prestan, siendo el principal el transporte público y privado, que sumado a una inexistente o mala planificación urbana, tanto en el aspecto vial, ordenamiento territorial y gestión de la calidad ambiental, se posiciona como un factor significativo en la contaminación del aire (Comité de Gestión: Iniciativa de Aire Limpio, 2010).

Según la Figura 7, del informe PISA, del Comité de Gestión: Iniciativa de Aire Limpio, 2010, con relación a las concentraciones de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) halladas en el periodo 2007-2010, se observa que en la mayoría de los casos las concentraciones son menores al valor establecido por el ECA (80 µg/m<sup>3</sup>), y que en los últimos 4 años ha ido disminuyendo, mostrando una tendencia a la reducción de su concentración en el ambiente.

Los valores de SO<sub>2</sub> han disminuido significativamente con respecto al estudio del año 2000, encontrándose los valores por debajo de los ECA de Aire. Esto podría responder al hecho que hay una reducción del azufre en los combustibles que actualmente se comercializan en Lima y Callao y que el mercado de combustibles alternativos contribuye a esta mejora.



**Figura 7: Comportamiento anual del dióxido de azufre en Lima y Callao. Periodo 2007 – 2010.**

FUENTE: DIGESA. 2010.

Además, en el estudio del Comité de Gestión (2010), se señala que a través del Comité Técnico de Normalización CTN 031, se aplican y describen tres clases de combustibles diésel para varios tipos de motores diésel:

- Combustible diésel N° 1 o D1
- Combustible diésel N° 2 con 350 mg/kg ppm de Azufre o D2 S-350
- Diésel N° 2 con 50 mg/kg (ppm) de azufre o D2 S-50.

Para Lima y Callao, se han presentado avances que han requerido de inversiones significativas y compromisos por las refinerías, en relación al combustible diésel; luego de la eliminación del plomo de las gasolinas en el año 2010, entra en vigencia el uso del Diésel 2 con bajo contenido de azufre (50 ppm) en Lima y Callao, como se indicó en párrafos anteriores, en el marco legal aplicable al dióxido de azufre.

Sin embargo, en una carta de aclaración por parte del MINAM a la Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía (2013) señala diversos puntos en respuesta a ciertas declaraciones respecto al estándar de calidad ambiental para aire, donde señala:

- El estándar de calidad ambiental fue aprobado mediante D.S. 003-2008-MINAM el 21 de agosto del 2008, que en ese entonces era más de cuatro (04) años desde que se aprobaron estos estándares que establecen el nivel máximo de dióxido de azufre presente en el aire, en su condición de cuerpo receptor, para que no represente un riesgo significativo para la salud de las personas ni al ambiente.
- Los ECA de aire tienen como principal propósito proteger la salud de la población, estableciendo plazos de adecuación a las actividades existentes. Al respecto se aclaró que el ECA aire para dióxido de azufre fue regulado por primera vez en Perú en el año 2001, a través del D.S. N° 074-2001/PCM, el que fue actualizado en el año 2008 mediante el D.S. N° 003-2008-MINAM, donde la aplicación gradual de los ECA aire para dióxido de azufre está establecido en los plazos fijados desde el año 2001 (365  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  diario y 80  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  anual), los nuevos valores a partir del año 2009 (80  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  diario) y posteriormente para el 2014 (20  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  diario).
- Existen ciudades que ya cumplen el valor establecido para el dióxido de azufre para el año 2014, (20  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), es decir que la probabilidad de que esta población se enferme por exposición a dióxido de azufre es de un riesgo bajo. Entre estas ciudades podemos mencionar a Chiclayo, Piura, Cusco, Iquitos, Pucallpa, Tacna, y gran parte de los

distritos de Lima y Callao que vienen siendo monitoreadas por el SENAMHI y DIGESA.

- Que es incorrecto decir que todas las actividades económicas serán afectadas por el actual ECA de 80 microgramos por metro cúbico para 24 horas, debido a que todas las ciudades del país, con excepción de La Oroya, cumplen con dicho estándar. Este incumplimiento está relacionado directamente al caso de macroemisores cuya responsabilidad directa en el aporte de dióxido de azufre está establecida y determinada por la autoridad ambiental. No es recomendable, por ello, extender episodios locales de incumplimiento del ECA en alguna localidad a todo el país.
- Que los actuales valores de ECA aire que se están ejecutando en el país, han permitido desarrollar en 13 ciudades Planes de Mejora de la Calidad, para luego incrementarse a 31 ciudades y contribuir a la disminución gradual de las emisiones del dióxido de azufre, mejorando la calidad de los combustibles, mediante cambios en su matriz para el sector industrial, ordenamiento del transporte para reducir las horas de viaje, retiro del servicio público de unidades mayores a 15 años de antigüedad, entre otras.
- La tecnología de reducción de emisiones de dióxido de azufre existe desde hace muchos años. Para el caso del Perú, estas han sido introducidas después que las plantas industriales y refinerías habían iniciado sus actividades, considerándose el costo de mitigación como externalidad de los proyectos. Sin embargo bajo los principios del desarrollo sostenible, estas actividades deben incorporar controles y un mejor manejo de sus emisiones al ambiente, ya que han venido operando sin las medidas de mitigación y control generándose los pasivos ambientales que en la actualidad se tiene, pese a que dichas actividades produjeron utilidades que permitan la implementación o adecuación de dichas tecnologías.

Nava et al. (2003) señalan que el inventario detallado por mes, tanto del volumen demandado de los petrolíferos como de la especificación de su contenido de azufre, y la concentración atmosférica del contaminante  $SO_2$ , son las variables apropiadas para la evaluación y el seguimiento de las tareas específicas de los programas de calidad del aire dirigidas a la reducción de este contaminante, evaluando dichas variables para el análisis del combustible y la calidad del aire ambiental:

- Dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>)

Determina la concentración de dicho contaminante en la atmósfera de Lima, estableciendo la relación con el contenido de azufre de los combustibles para determinados periodos de tiempo. Permitirá conocer como la introducción de nuevas formulaciones ha modificado la calidad del estado del aire.

- Azufre en los combustibles diésel

Determina el contenido de azufre (en ppm) en los combustibles diésel, que permitirá obtener la correlación con la concentración de SO<sub>2</sub> en la atmósfera. Asimismo, esta variable permitirá corroborar la introducción de nuevas formulaciones en la composición del diésel, permitiendo el establecimiento de etapas definidas.

- Demanda de combustible diésel

Determina la variación en el consumo de combustibles diésel a lo largo del periodo de estudio. Permitirá conocer si con el aumento en el consumo de este combustible (con nuevas formulaciones), se ha mantenido una relación directa o inversa con la concentración de SO<sub>2</sub> en el aire ambiental.

## **2.5. ENFERMEDADES RESPIRATORIAS**

La Defensoría del Pueblo (2005?), en su informe defensorial No. 116, indica que la calidad del aire es una condición muy importante ya que cada persona respira, en promedio, más de 3,000 galones de aire al día, unos 2 galones por minuto, por lo que cada componente debe encontrarse en equilibrio en la atmósfera. La emisión de alguna sustancia en cantidades mayores a las que normalmente posee, impacta la calidad del aire y éste se contamina, representando un peligro para el medio ambiente y/o la vida de las personas. Por ejemplo, el material particulado, como las partículas de diámetro menor a 10 y 2.5 micrones (PM 10 y 2.5), son especialmente nocivas para la salud de las personas por la facilidad que tienen de penetrar el sistema respiratorio, afectando los tejidos más profundos de los pulmones, así, los principales impactos son la alteración funcional y anatómica del pulmón, incremento de infecciones respiratorias, asma, alergias, la exacerbación de enfermedades pre-existentes y el aumento de mortalidad por enfermedades pulmonares y cardíacas. Estudios epidemiológicos realizados a nivel internacional indican que los grupos más vulnerables son los niños y adultos mayores, especialmente aquellos que sufren enfermedades respiratorias, mientras que también se señala, que en el Perú las investigaciones epidemiológicas que

asocian las enfermedades respiratorias al medio ambiente son muy limitadas.

Diversas encuestas del Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) demuestran que las familias reportan como principal molestia las enfermedades respiratorias, seguidas de las digestivas. Asimismo, el Ministerio de Salud (MINSA) y la Oficina General de Epidemiología han mostrado que el Síndrome de Obstrucción Bronquial, el asma y las infecciones respiratorias agudas constituyen una de las cinco principales causas de atención médica.

Como señalan Hardoy, J., Mitlin, D, citado por la Defensoría del Pueblo (2005?), “en el mundo se estima que medio millón de muertes son atribuibles al material particulado y al dióxido de azufre en el aire”, por lo que se intuye una relación significativa de los datos de morbilidad y mortalidad de las personas con las concentraciones de este contaminante atmosférico.

Una clasificación de enfermedades puede definirse como un sistema de categorías a las que se asignan de características relacionadas a la enfermedad de conformidad con criterios establecidos. La clasificación puede girar en torno a muchos ejes posibles, y la elección será determinada por el uso que se hará de las estadísticas recopiladas (OPS, 2003).

De la clasificación internacional de enfermedades, realizada por la OPS – Organización Panamericana de la Salud (2003), se llegó a categorizar las enfermedades en 21 capítulos y éstas a su vez en sub-categorías, según características comunes o ciertos puntos que los relacionaban. Para el caso de las enfermedades respiratorias corresponde al capítulo X, donde la codificación abarca desde el J00 al J99, y los cuales comprende:

- Infecciones agudas de las vías respiratorias superiores
- Influenza (gripe) y neumonía
- Otras infecciones agudas de las vías respiratorias inferiores
- Otras enfermedades de las vías respiratorias superiores
- Enfermedades crónicas de las vías respiratorias inferiores
- Enfermedades del pulmón debidas a agentes externos
- Otras enfermedades respiratorias que afectan principalmente al Intersticio

- Afecciones supurativas y necróticas de las vías respiratorias inferiores
- Otras enfermedades de la pleura
- Otras enfermedades del sistema respiratorio

## **2.6. EXPERIENCIAS INTERNACIONALES RELACIONADAS**

Como también señala el MINAM, 2013, en la carta aclaratoria, en lugares como Japón, Europa y Estados Unidos de Norteamérica, se considera que el dióxido de azufre no es un problema de contaminación ambiental ya que los niveles anuales no superan los 20  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (a excepción de algunos países de Europa del Este), ello debido a la implementación de diésel y gasolinas de bajo azufre, cuya práctica en el Perú está en implementación y proceso de adecuación por parte de refinerías y puntos de venta. Así mismo, en dichos países desarrollados no se toma en cuenta el estándar de 24 horas, sino el estándar horario, muy exigente, para prevenir exposiciones de corto plazo a la población.

### **2.6.1. Honduras**

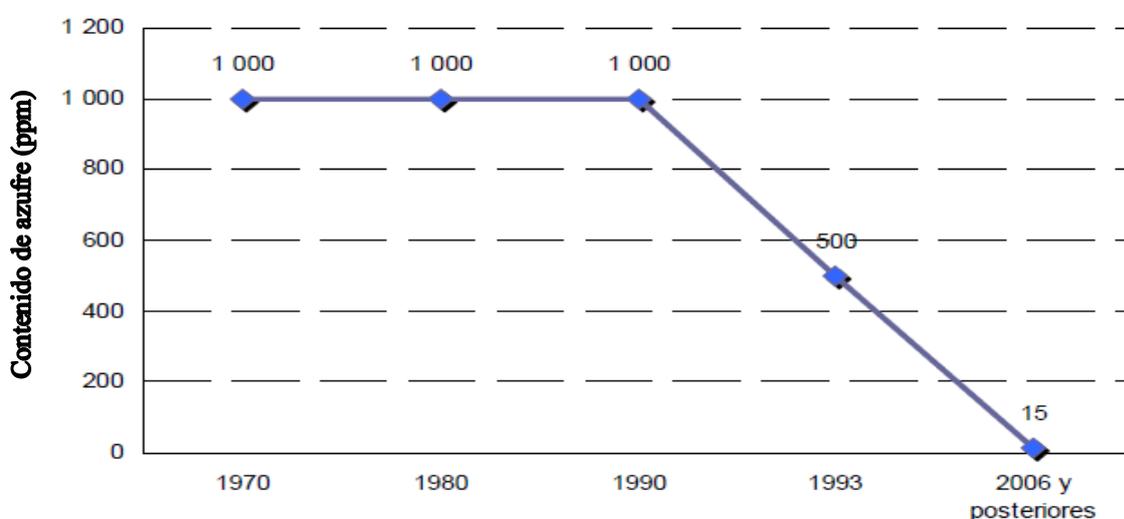
Además de los daños oficialmente reconocidos, la Federación de Asociaciones de Distribuidores y Concesionarios de Vehículos de Centroamérica y El Caribe (FEDICAR) ha alertado a las autoridades sobre el daño causado por el azufre del diésel a los motores de los vehículos equipados con nuevas y viejas tecnologías. Por ello han solicitado llevar a cabo acciones para mejorar la calidad del combustible. Los ministros de ambiente han señalado el peso de las emisiones de contaminantes en el sector transporte frente a las emisiones atmosféricas totales. Han subrayado también la necesidad de reducir el contenido de azufre en los combustibles vehiculares y aprovechar los desarrollos tecnológicos en vehículos y tecnologías asociadas. En 2008 los ministros decidieron promover la reducción del contenido de azufre en los combustibles, aspirando a una meta de 50 partes por millón de azufre, con énfasis en los problemas de calidad del aire en las áreas metropolitanas. Advertieron que para alcanzar la meta se deberían considerar las realidades nacionales, el fomento de recursos financieros y la transferencia de tecnología. También decidieron incluir la mejora de los combustibles y de los vehículos en las prioridades del Foro de Ministros en materias de Salud y Medioambiente (XVI Reunión del Foro de Ministros de Medio

Ambiente de América Latina y el Caribe, Santo Domingo, República Dominicana, 27 de enero al 1 de febrero de 2008).

La promulgación de estándares de emisiones más estrictos para los vehículos diésel livianos y pesados de carga y pasajeros obligó a la industria de la refinación a producir combustibles con menor contenido de azufre (Rodríguez, 2012).

### 2.6.2. Estados Unidos

Rodríguez (2012) menciona que las acciones para reducir el impacto ambiental de los vehículos a gasolina y diésel en los Estados Unidos se iniciaron en 1963 con la promulgación del Acta del Aire Limpio (Clean Air Act, CAA), que ordenó adoptar estándares de control de la calidad del aire a nivel nacional. Así, como se muestra en la Figura 8, para cumplir los estándares de emisiones de 2007 en adelante se limitó el contenido de azufre del diésel a 15 partes por millón en peso (ppm peso) con el fin de garantizar la funcionalidad de los dispositivos instalados en los motores: convertidor de oxidación (Oxidation Catalytic Converter), filtros de partículas (Diésel Particulate Filters, DPF), convertidores de almacenamiento catalítico de NO<sub>x</sub> (NO<sub>x</sub> Storage Catalytic Converter, SCC) y sistema de reducción catalítica (Selective Catalytic Reduction, SCR System).

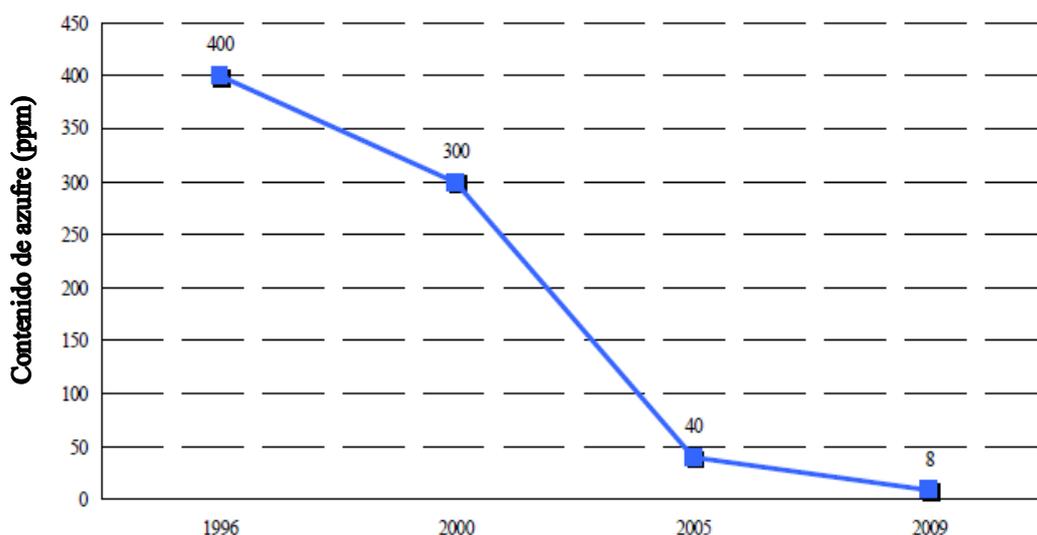


**Figura 8: Estados Unidos: Evolución del contenido de azufre del combustible diésel para uso automotriz, 1970-2006.**

FUENTE: USEPA, citado por Rodríguez (2012).

### 2.6.3. Unión Europea

La Directriz 98/69/EEC, vigente a partir del año 2000, define la norma Euro III y establece la norma Euro IV a partir de 2005. La norma Euro IV estableció la reducción de emisiones de CO y HC+NO<sub>x</sub>+PM en 22% y 50% respecto de la norma Euro III. Esta medida fue acompañada de la reducción del contenido de azufre del diésel, como se observa en la Figura 9, mediante la incorporación de tecnología avanzada en los motores y en los sistemas de control de emisiones tales como la recirculación enfriada de gases de escape y de dispositivos para la reducción de NO<sub>x</sub> y PM (Rodríguez, 2012).



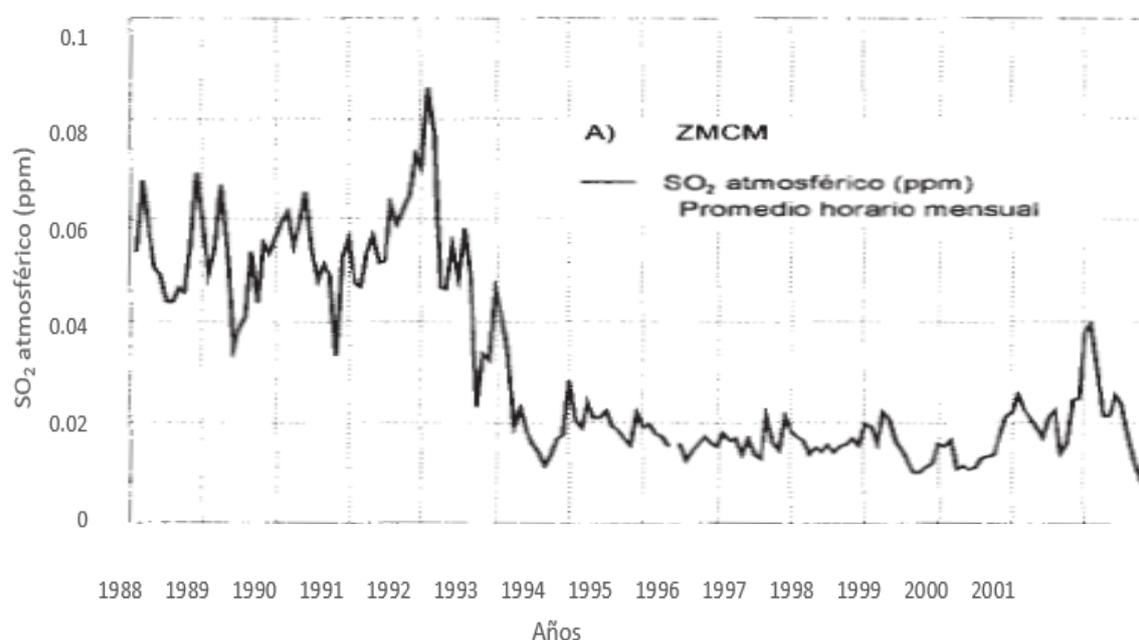
**Figura 9: Unión Europea: Evolución del contenido de azufre del combustible diésel para uso automotriz, 1970-2006.**

FUENTE: Delphi, citado por Rodríguez, 2012.

### 2.6.4. Zona Metropolitana de la Ciudad de México, México

Como sostiene Nava et. al (2003) en su estudio, la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) posee características particulares; una de las principales es que en ella habita el 28.5% de la población del país por lo que se desarrolla una actividad socioeconómica intensa. Las regiones que presentan estas condiciones demandan una gran cantidad y variedad de energéticos que en su mayor parte son combustibles fósiles del tipo de los petrolíferos (gasolina, diésel, combustóleo, gasóleo, etc.), usados principalmente en

el transporte y la industria (Pemex 2001, SENER 2002). Una consecuencia del consumo de combustibles son los problemas de contaminación atmosférica por la emisión de diversos compuestos, entre ellos el dióxido de azufre (GDF 2000). Debido a esto, desde 1986 se impusieron compromisos a la industria petrolera, representada por Petróleos Mexicanos (Pemex), para el control de las emisiones de  $\text{SO}_2$  a la atmósfera. Como consecuencia de estas acciones la ZMCM ha contado con diversos esquemas en la oferta de combustibles fósiles, en particular de los llamados petrolíferos. La Figura 10 muestra el efecto general de la disminución de esta concentración para la ZMCM; se puede observar que la reducción de los niveles se inició en 1992, continuó de manera apreciable en 1993 y con menor pendiente en el periodo 1994-1999.



**Figura 10: Concentración de dióxido de azufre atmosférico para la ZMCM.**

FUENTE: Nava et al. 2003

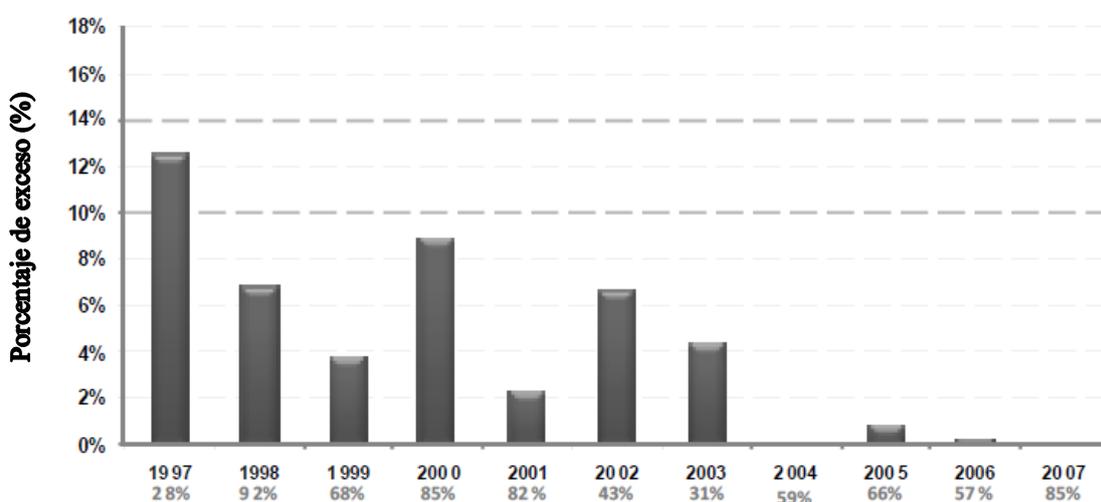
Ya que hay una relación directa entre el contenido total de azufre de los combustibles distribuidos en una cierta región y la concentración de  $\text{SO}_2$  en su atmósfera (JICA 1988, CMPCCA 1990, citado por Nava et. al, 2003), pues casi la totalidad de azufre presente en los combustibles se oxida para formar este contaminante, se propuso realizar acciones orientadas a la elaboración de gasolina y diésel con menor contenido de azufre mediante la implementación de tecnologías avanzadas de hidrodesulfuración de combustibles tradicionales, así como la introducción de combustibles más limpios en las termoeléctricas,

la industria, el transporte y los servicios. Todo esto ha dado como resultado que en la ZMCM se consuman combustibles con una importante reducción en su contenido de azufre (Pemex 1994, DDF 1996, citado por Nava et. al, 2003).

### 2.6.5. Bogotá, Colombia

Como señala Gaitán y Behrentz (2009), el deterioro de la calidad del aire en Bogotá (y su directa relación con problemas de salud respiratoria y cardiaca) ha generado crecientes preocupaciones por parte de las autoridades ambientales y la salud pública de la ciudad, y el problema se viene agravando en los últimos años, causado por el acelerado crecimiento económico que se ha estado presentando en la ciudad. Este crecimiento, se ve manifestado en una mayor demanda de energías y el aumento en consumo de combustibles fósiles.

Los vehículos de transporte público de la ciudad se alimentan principalmente de combustible diésel, y para el caso de la ciudad, hasta el 1 de Julio del 2008, dicho combustible contaba con elevados niveles de azufre que superaban las 1000 partes por millón (ppm); de dicha fecha en adelante, en la ciudad se distribuye un diésel con menor azufre, de 500 ppm. Producto de ello, como ilustra la Figura 11, el porcentaje de exceso de la norma para dióxido de azufre, ha ido disminuyendo en los años que se implementaron tales medidas.



**Figura 11: Índice de porcentaje de exceso a la norma anual de dióxido de azufre en Bogotá.**

FUENTE: Gaitán y Behrentz, 2009.

Mediante la implementación del sistema de monitoreo, se pudo determinar que para los resultados referentes a las violaciones de la norma de la calidad del aire, no se presenta un problema de contaminación respecto al SO<sub>2</sub> y que las concentraciones atmosféricas superan raras veces la norma anual, calculado a partir de los promedios diarios de SO<sub>2</sub> reportados por todas las estaciones de la ciudad.

#### **2.6.6. Carta Mundial de Combustibles (WWFC)**

La primera edición de este documento fue de 1998 y la última de 2006. Su contenido es la posición de los fabricantes de vehículos y de motores sobre la calidad de los combustibles y su relación con los estándares de emisiones, teniendo presente el compromiso de reducir el impacto ambiental derivado del transporte automotor (ACEA, Alliance, EMA, JAMA, 2006).

El documento no identifica los estándares de emisiones vinculados a la calidad de los combustibles, pero establece una relación cualitativa con el estado de las regulaciones en la materia; respecto del combustible para motores diésel, la WWFC identifica las siguientes cuatro categorías:

- Categoría 1: Incluye mercados sin normas de emisiones o con normas cuya aplicación se encuentra en las etapas iniciales. Esta categoría incluye básicamente recomendaciones para el cuidado del vehículo/motor y la protección de los sistemas de control de emisiones.
- Categoría 2: Incluye mercados con normas de emisiones estrictas y atención de otras demandas (Se podría ubicar al Perú en esta categoría).
- Categoría 3: Incluye mercados con normas avanzadas de control de emisiones y aplicaciones particulares de los mismos.
- Categoría 4: Incluye mercados con los sistemas de control de emisiones más avanzados y sofisticados, particularmente los de tecnologías de post tratamiento para la reducción y control de NOx y PM.

En la Tabla 6 se observa los límites máximos de azufre para cada categoría de diésel.

**Tabla 6: Especificaciones del diésel automotriz según la WWFC para el contenido de azufre, para las distintas categorías.**

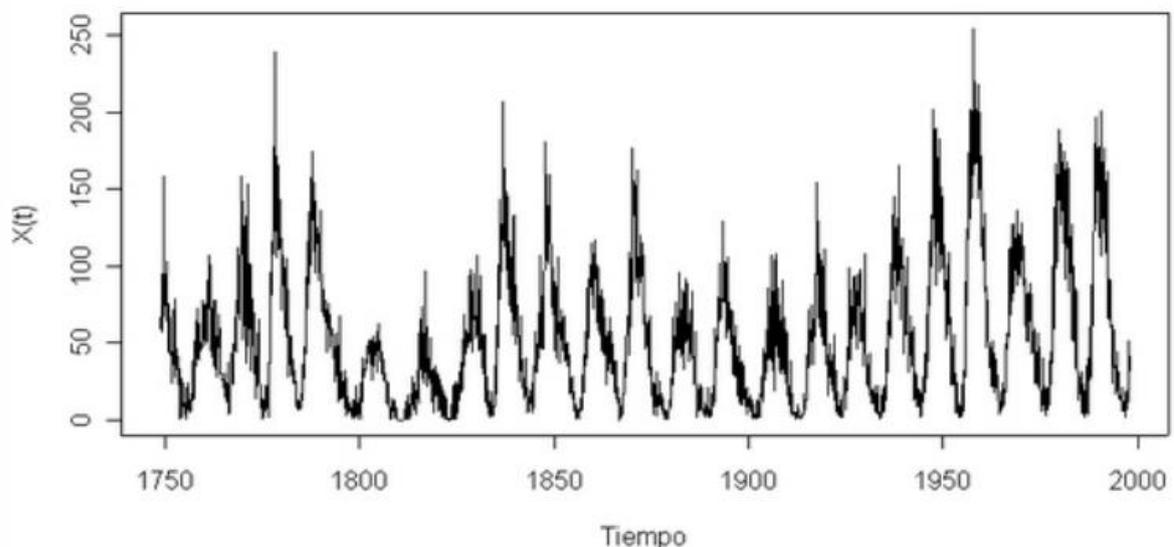
Categoría	Unidades	Límite máximo
1	mg / kg (también expresado como ppm en peso)	2000
2		300
3		50
4		10

FUENTE: ACEA, citado por Rodríguez, 2012.

## 2.7. ANÁLISIS DE SERIES DE TIEMPO

Variables temporales: variables que se observan a lo largo del tiempo.  $Y_t$  indica la variable  $Y$  en el momento  $t$ . Una serie temporal será el conjunto de  $T$  observaciones, una observación por cada una de las variables;  $Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_T$ ; también llamado una serie cronológica. A dichas variables de una serie temporal se denominan realizaciones.

Tomando en cuenta a Molinero (2004), como se muestra en la Figura 12, mediante el modelo clásico del análisis de las series temporales, el primer paso obligatorio para analizar una serie temporal es presentar un gráfico de la evolución de la variable a lo largo del tiempo.



**Figura 12: Representación de una serie temporal.**

FUENTE: Molinero, 2004.

Lo siguiente consistirá en determinar si la secuencia de valores es completamente aleatoria o si, por el contrario, se puede encontrar algún patrón a lo largo del tiempo.

La metodología tradicional para el estudio de series temporales fundamentalmente se basa en descomponer las series en varias partes: tendencia, variación estacional o periódica, y otras fluctuaciones irregulares:

- Tendencia: Es la dirección general de la variable en el periodo de observación, es decir el cambio a largo plazo de la media de la serie.
- Estacionalidad. Corresponde a fluctuaciones periódicas de la variable, en periodos relativamente cortos de tiempo.
- Otras fluctuaciones irregulares. Después de extraer de la serie la tendencia y variaciones cíclicas, quedarán una serie de valores residuales, que pueden ser o no totalmente aleatorios.

### **III. MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **3.1. MATERIALES**

##### **3.1.1. Datos de las concentraciones de dióxido de azufre**

Constituidos por los datos registrados por las estaciones de monitoreo implementadas por la DIGESA, del periodo 2000 – 2013. Se contabilizó un total de 554 registros entre las 5 estaciones de las respectivas zonas de la ciudad de Lima y Callao, las cuales son: estación CONACO (Lima Centro), estación Hipólito Unanue (Lima Este), estación María Auxiliadora (Lima Sur), estación Santa Luzmila (Lima Norte) y estación Dirección de Salud I-CALLAO (Callao). Los registros obtenidos están expuestos en el Anexo 1.

##### **3.1.2. Datos del contenido de azufre de los combustibles diésel**

Constituidos por los registros de los monitoreos realizados por el OSINERGMIN en las fiscalizaciones realizadas a distintos puntos de venta, plantas de abastecimiento y refinerías, principales abastecedores a Lima Metropolitana y el Callao, en el periodo 2005 – 2013. Se contabilizó un total de 201 registros. Los registros obtenidos están expuestos en el Anexo 2.

##### **3.1.3. Datos de la demanda de combustibles diésel**

Constituidos por los datos registrados por el OSINERGMIN realizados mensualmente por departamento, especificando el tipo de combustible utilizado, para el periodo 2005 – 2013. Se contabilizó un total de 136 registros mensuales del consumo de combustibles diésel en Lima y Callao. Los registros obtenidos están expuestos en el Anexo 3.

#### **3.1.4. Datos del número de casos de enfermedades respiratorias**

Constituidos por los datos registrados por el Ministerio de Salud (MINSA) realizados anualmente, para la ciudad de Lima y Callao, para el periodo 2002 – 2013. Se contabilizó un total de 1440 registros, entre los distritos más cercanos a la estación de monitoreo, población más vulnerable, categoría de la enfermedad y año de registro. Los registros obtenidos están expuestos en el Anexo 4.

### **3.2. METODOLOGÍA**

La presente tesis se desarrolló en función a los datos de evaluaciones y monitoreos realizados en Lima Metropolitana y el Callao, por lo que dicho espacio se constituyó como el área de estudio. En este sentido, Lima ciudad está conformada por 50 distritos, divididas en 5 zonas (siendo una de ellas solo Callao) según su ubicación geográfica, los cuales se distribuyen como se muestra en la Figura 13.



Fuente: Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI).

**Figura 13: Distribución zonal, por distritos, de Lima Metropolitana y Callao**  
FUENTE: INEI, 2014.

Mientras que la distribución de los distritos por zonas, son de la siguiente manera:

- Lima Norte: 8 distritos; Ancón, Carabayllo, Comas, Independencia, Los Olivos, Puente Piedra, San Martín de Porres, Santa Rosa.
- Lima Centro: 15 distritos; Barranco, Breña, Jesús María, La Victoria, Lima, Lince, Magdalena del Mar, Miraflores, Pueblo Libre, Rímac, San Borja, San Isidro, San Miguel, Santiago de Surco, Surquillo.
- Lima Este: 9 distritos; Ate, Chaclacayo, Cieneguilla, El Agustino, La Molina, Lurigancho, San Juan de Lurigancho, San Luis, Santa Anita.

- Lima Sur: 11 distritos; Chorrillos, Lurín, Pachacamac, Pucusana, Punta Hermosa, Punta Negra, San Bartolo, San Juan de Miraflores, Santa María del Mar, Villa El Salvador, Villa María del Triunfo.
- Callao: 7 distritos; Bellavista, Callao, Carmen de la Legua Reynoso, La Perla, La Punta, Mi Perú, Ventanilla.

### **3.2.1. Concentraciones de dióxido de azufre**

#### **a. Recolección de registros**

Para la evaluación de las concentraciones de SO<sub>2</sub>, se recolectó los registros mensuales de las 5 estaciones de monitoreo implementadas por la Dirección General de Salud (DIGESA), para el periodo comprendido entre el 2000 y 2013. Como se observa en la Figura 14 la distribución de dichas estaciones es en determinados puntos de las zonas de Lima Metropolitana y Callao, de la red de monitoreo destinada a la evaluación de la calidad del aire y que ha tratado de abarcar el espacio geográfico que comprende la totalidad de la ciudad, estimando un monitoreo representativo para Lima.

Si bien se contó con registros mensuales del periodo en estudio (2000 – 2013), se precisa que en determinados periodos no se contaba con registros en algunas estaciones de monitoreo y por lo tanto presentaba algunos vacíos respecto a su evaluación. El promedio de los registros como una evaluación general, de Lima como ciudad, permitió disminuir dichos sesgos; sin embargo, se considera necesario una mayor recopilación de registros para una mejor evaluación por zona de estudio.



**Figura 14: Red básica de monitoreo de la calidad del aire**  
 FUENTE: DIGESA, 2013.

El muestreo y análisis del dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ), para las estaciones de la DIGESA implementadas en Lima, sigue un método de muestreo activo (tren de muestreo) que consiste en un sistema dinámico ensamblado y compuesto por una bomba presión-succión, un controlador de flujo y una solución de captación que sirve para coleccionar gases según los parámetros utilizados para su diseño. El aire del ambiente pasa a través de la solución captadora de  $\text{SO}_2$  a razón por un período de veinticuatro (24) horas y dicha muestra obtenida se analiza en laboratorio, siendo expresados los resultados en microgramos por metro cúbico ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). En específico para el  $\text{SO}_2$ , es determinado por la absorción del gas en solución de captación de peróxido de hidrógeno a una razón de flujo de 2.3 a 2.5 litros por minuto, en un periodo de

muestreo de 24 horas. Para el análisis químico se utiliza la turbidimetría y se expresan los resultados en microgramos por metro cúbico ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), determinando el peso del dióxido de azufre recolectado en la solución adsorbente en  $\mu\text{g}$  y el volumen de aire en  $\text{m}^3$ , dando los resultados en condiciones normales de  $25\text{ }^\circ\text{C}$  y 1 atm de presión. Además, también se viene utilizando el método automático donde se tiene un equipo analizador cuyo principio de análisis es el de fluorescencia y que registra datos de la concentración continuamente, también en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . (DIGESA, 2006)

b. Análisis estadístico

Para la evaluación de los registros históricos se realizó los siguientes procedimientos:

- Conteo de datos registrados para la estación CONACO (Lima Centro): 104 datos.
- Conteo de datos registrados para la estación HIPÓLITO UNANUE (Lima Este): 121 datos.
- Conteo de datos registrados para la estación MARIA AUXILIADORA (Lima Sur): 115 datos.
- Conteo de datos registrados para la estación SANTA LUZMILA (Lima Norte): 104 datos.
- Conteo de datos registrados para la estación Dirección de Salud I, CALLAO (Callao): 110 datos.
- Promedios mensuales por cada año del periodo en estudio, promediando los 5 registros de las 5 estaciones de monitoreo en un solo promedio mensual. Dicho proceso llegó a recabar 168 datos.
- Promedio anual por cada estación de monitoreo. El procesamiento de la información concluyó en 70 datos.
- Promedio de los resultados anuales de las 5 estaciones en un promedio global anual, por cada año de monitoreo, se obtuvieron 14 datos.

El análisis realizado fue por estación de monitoreo, indicando la ubicación de dicha estación, enfocándose en los distritos más cercanos. Además se realizó la evaluación mensual para los datos obtenidos, así como un promedio anual por zonas, para identificar periodos críticos o con una tendencia. Adicionalmente se realizó un análisis global, diferenciando el comportamiento de las concentraciones de manera

mensual para cada estación en un solo gráfico, así como un promedio de todos los datos, mes a mes, logrando obtener tendencias individuales por cada zona de estudio y una a escala general, como Lima ciudad y Callao, para la identificación de periodos de variación de las concentraciones. Adicionalmente, para una mayor referencia espacial, se realizaron gráficos con el software Surfer, identificando el comportamiento del SO<sub>2</sub> en los años 2000, 2009 y 2014, así como la dispersión del contaminante y zonas más afectadas.

### **3.2.2. Contenido de azufre y demanda de los combustibles diésel**

#### **a. Recolección de registros**

Respecto a la evaluación del contenido de azufre en los combustibles diésel, se recolectó los registros mensuales del monitoreo realizado por la autoridad competente. Para ello se recolectaron los registros históricos en las entidades correspondientes, encargadas de dicha base de datos. En este caso, el Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (OSINERGMIN), aclaró los siguientes puntos, respecto al archivo histórico del contenido de azufre en los combustibles diésel, del cual es encargado de la supervisión:

- Con relación a los registros del contenido de azufre (ppm) en Refinerías y Plantas de Abastecimientos para el período 2000 al 2004, debe precisarse que durante dicho periodo, OSINERGMIN efectuó las labores de supervisión por control de calidad relacionadas solo a los siguientes ensayos: punto de inflamación, destilación e índice de cetano.
- Con relación a los registros de contenido de azufre (ppm) en los combustibles diésel en las estaciones de servicios de la ciudad de Lima, desde el año 2000 al 2010, debe precisarse que durante dicho periodo, OSINERGMIN efectuó las labores de supervisión por control de calidad relacionadas solo al siguiente ensayo: Punto de Inflamación.
- Las Refinerías y Plantas de Ventas que comercializan combustibles diésel en la ciudad de Lima, son: Refinería Conchán, Planta de Ventas Conchán, Planta de Ventas La Pampilla, Planta de Ventas Herco y Terminal Callao.
- El método de ensayo utilizado para el análisis del Contenido de Azufre fue el ASTM D4294.

Por lo tanto, los registros recolectados están conformada por los siguientes datos:

- Contenido de Azufre en Refinerías y Plantas de Abastecimientos - período 2005 al 2013; combustibles comercializados en Lima, datos mensuales.
- Contenido de Azufre en Grifos y Estaciones de Servicios - período 2011 al 2013; muestras representativas en distintos grifos y estaciones de servicios en Lima, en diferentes establecimientos cada mes.

Respecto a la metodología utilizada en la medición del contenido de azufre en el combustible diésel y dispuesto según normativa, es la ASTM D4294, un método estándar estadounidense que permite la medición de las concentraciones de azufre en los hidrocarburos tales como los diésel, naftas, keroseno, etc. y el cual es expresado en % de masa. El rango de concentración que aplica es de 0.015 a 5 % en masa de sulfuro. Dicho procedimiento indica que la muestra deba ser colocada en un haz emitido desde una fuente de rayos x. Los datos obtenidos de la radiación son medidos y el conteo acumulado es comparado con conteos de muestras preparadas y calibradas previamente para obtener la concentración de azufre en % de masa. Dicho método provee una medición rápida y precisa de la concentración total de azufre en productos de petróleo, con una mínima preparación de muestra, donde el tiempo promedio de análisis es de 2 a 4 minutos por muestra y donde la concentración de azufre en la muestra es automáticamente calculada de la curva de calibración.

Respecto a la demanda de los combustibles diésel en la ciudad de Lima, se recolectó los registros por parte de la autoridad competente. En este caso también se obtuvieron los registros del Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (OSINERGMIN). Se precisa que los registros de la demanda de combustibles diésel en Lima son a partir de Julio del 2005 hasta Diciembre del 2013.

Los datos recolectados fueron en forma mensual, cuyas unidades de medición están expresadas en galones/día. Además, según el periodo comprendido, se tienen registros de combustibles diésel de diferentes tipos, según la comercialización y distribución de ellos para dicho periodo. Para realizar el análisis respectivo, se hizo la suma del consumo total de combustibles por mes, y se convirtió para estandarizar las unidades de los datos, para que sean expresados en miles de galones por mes.

Así, se trabajó con las sumas de las cantidades consumidas de los diferentes tipos de diésel, generando datos mensuales para el periodo 2005 al 2013 y recopilando 99 registros en total, además del acumulado para determinados cálculos.

b. Análisis estadístico

Con relación a la evaluación de los registros del contenido de azufre en los combustibles diésel, se trabajó con el registro de las refinerías y plantas de abastecimiento, del periodo 2005 al 2013, ya que se presentaba una mayor cantidad de datos, que podría representar mejor el comportamiento de esta variable en el tiempo de estudio. Dichos registros fueron de los tipos de combustible comercializados para determinados periodos, en datos mensuales por año de estudio, generando 42 registros. Se precisa que no todos los meses cuentan con los registros del contenido de azufre y se realizó una mayor fiscalización desde el año 2010, por lo que años anteriores se tienen registros dispersos.

La evaluación se realizó identificando las concentraciones para el contenido de azufre de los distintos tipos de combustible diésel que se comercializó para el periodo de estudio, diferenciándose en 3: diésel 2, diésel B2 y diésel B5. Así mismo, se realizó el promedio mensual de los datos obtenidos, en donde se haya tenido más de un monitoreo mensual, y obtener un resultado representativo para dicho mes.

Respecto al análisis de las normativas promulgadas relacionadas al contenido de azufre en los combustibles diésel, se evaluó periodos anteriores y posteriores según a la fecha de publicación y de aplicación de dichas normas y así apreciar tendencias, aumentos o reducciones que hayan sufrido producto de estas políticas implementadas.

El análisis de la demanda de combustibles diésel indica el comportamiento de aumento o disminución de dicha variable para el periodo de estudio, por lo que solo se realizó la suma de los combustibles diésel que fueron comercializados para determinados periodos, obteniéndose el total demandado por cada mes (se consideró el consumo según el tipo de combustible). Así, se realizó un gráfico de serie temporal,

situando los valores de demanda en el eje de ordenadas y la variable tiempo en el eje de abscisas y apreciar un mejor comportamiento de dicha variable, identificando la tendencia y correlación de los registros obtenidos, así como periodos de comercialización de los distintos tipos de diésel. Se obtuvieron los coeficientes de correlación con el tiempo y se definió la tendencia y las posibles proyecciones a futuro.

### **3.2.3. Influencia del contenido de azufre y demanda de los combustibles diésel en las concentraciones de dióxido de azufre**

Se realizó un primer análisis entre las variables de dióxido de azufre y demanda de combustibles diésel en el eje de ordenadas y la variable tiempo en el eje de las abscisas, evaluando un comportamiento combinado, identificando la tendencia y la correlación de los registros. También se realizó un análisis conjunto entre las variables de dióxido de azufre y contenido de azufre en el eje de ordenadas y la variable tiempo en el eje de las abscisas, evaluando un comportamiento entre ambas variables, identificando la tendencia y la correlación de los registros.

Se incluyó un cuadro de doble entrada para las variables de concentraciones de dióxido de azufre y el contenido de azufre y dióxido de azufre y demanda, en un gráfico de dispersión de las concentraciones de dióxido de azufre vs contenido de azufre en los combustibles diésel, para evaluar la correlación entre ellas ya que estas presentaban una mejor relación.

El uso del software R permitió el análisis de los resultados en una ecuación lineal de 3 variables y la formulación de un modelo matemático lineal de acuerdo a la correlación que se pueda encontrar entre dichas variables, así como la correlación que hay entre ellas. Las relaciones que se trabajaron fueron con el parámetro “dióxido de azufre” como variable dependiente y “contenido de azufre” y “demanda de combustibles” como variables independientes y definir los parámetros que más influencia tienen en las respectivas variables analizadas, identificando que variables tenían mayor influencia en la variable dependiente y en que etapas. Por último se realizaron cuadros de doble entrada para la identificación de periodos de mayor correlación entre cada una de las variables.

### **3.2.4. Influencia del dióxido de azufre, contenido de azufre y demanda de los combustibles diésel en las enfermedades respiratorias**

#### **a. Recolección de registros**

Para obtener las relaciones entre las variables se empezó con la recolección de los datos respecto a las enfermedades respiratorias para obtener el registro de todas las variables en cuestión. Respecto al número de casos de las enfermedades respiratorias en Lima y Callao, se recolectaron los registros por parte del Ministerio de Salud (MINSA). Los datos recolectados fueron de manera anual, especificados por el distrito al cual correspondían, además de la categoría al cual pertenecía dicha enfermedad pulmonar y cuya unidad de medición fue el número de casos. Para el caso del dióxido de azufre, se escogieron las siguientes categorías, relacionadas a la exposición a este gas y principalmente a afecciones en vías inferiores y superiores:

- J00–J06: Infecciones agudas de las vías respiratorias superiores
- J20–J22: Otras infecciones agudas de las vías respiratorias inferiores
- J30–J39: Otras enfermedades de las vías respiratorias superiores
- J40–J47: Enfermedades crónicas de las vías respiratorias inferiores
- J60–J70: Enfermedades del pulmón debidas a agentes externos

Cabe mencionar que a la actualidad, la entidades responsables de la vigilancia epidemiológica de Lima Metropolitana y el Callao cuentan con un sistema muy limitado a la detección de enfermedades respiratorias producto de la exposición a una mala calidad de aire y su respectiva gestión y toma de datos, por lo que se optó relacionar las categorías antes mencionadas como puntos directos al efecto del dióxido de azufre en la salud de las personas y, además, solo se tomaron los datos de las personas más sensibles a dicho efecto, los cuales fueron los niños hasta los 11 años y adultos mayores a 60 años, según lo indicado por la bibliografía.

#### **b. Análisis estadístico**

Para el análisis de las relaciones existentes entre las variables de las concentraciones de dióxido de azufre, contenido de azufre y demanda de combustibles diésel, respecto al número de enfermedades respiratorias, en primer lugar se trabajó de manera

individual con esta última variable para obtener su comportamiento y tendencia, y se procuró realizarlo en los distritos cercanos a las estaciones de monitoreo, como con las anteriores variables, para mantener una relación y estándar respecto a los datos, a una escala anual. Además se realizó un promedio de los datos en su totalidad para obtener un comportamiento anual en Lima ciudad y hallar también la relación y su comportamiento que mantienen los datos en el tiempo.

Para el análisis de los resultados y obtener la relación e influencia de las demás variables en las enfermedades respiratorias, también se utilizó el software R, que permitió la formulación de una ecuación lineal con 4 variables y permitió formular un modelo matemático lineal de acuerdo a la correlación que se pueda encontrar entre dichas variables, así como la correlación que hay entre ellas y ver la de mayor influencia. Las relaciones que se trabajaron fueron con el parámetro “enfermedades respiratorias” como variable dependiente y “dióxido de azufre”, “contenido de azufre” y “demanda de combustible” como variables independientes. En este sentido se definen los parámetros que más influencia tuvieron en las respectivas variables analizadas, a partir del cual se realizó otro análisis para obtener un mejor modelo. Por último, según la significancia encontrada, se enumeraron determinadas medidas de control y mitigación acorde a la variable de mayor influencia.

## **IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Después de los análisis realizados para las variables propuestas y expuestas, se tiene a continuación la evaluación y recopilación de registros:

### **4.1. CONCENTRACIONES DE DIÓXIDO DE AZUFRE**

Se ha agrupado las variables de las concentraciones de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), obtenidas de los análisis de resultados obtenidos del monitoreo del DIGESA en sus estaciones de calidad de aire, y en los que se observa ciertos sesgos para determinados periodos. No se tiene una información específica acerca de la falta de esos datos pero se estima que fue por motivos de calibración de equipos, por problemas técnicos no previstos o también se puede atribuir a la pérdida de datos por el factor humano u otras razones.

A continuación se presentan los datos recopilados del análisis realizado de los datos obtenidos de la DIGESA, correspondiente a su Programa Nacional de Vigilancia Sanitaria de la Calidad del Aire. En el Anexo 1 se podrá verificar toda la información real sin procesamiento.

Como se observa en la Tabla 7, se realizó el promedio anual por estación de monitoreo con el fin de apreciar el comportamiento individual y caso particular que se pueda dar para cada diferente zona de estudio.

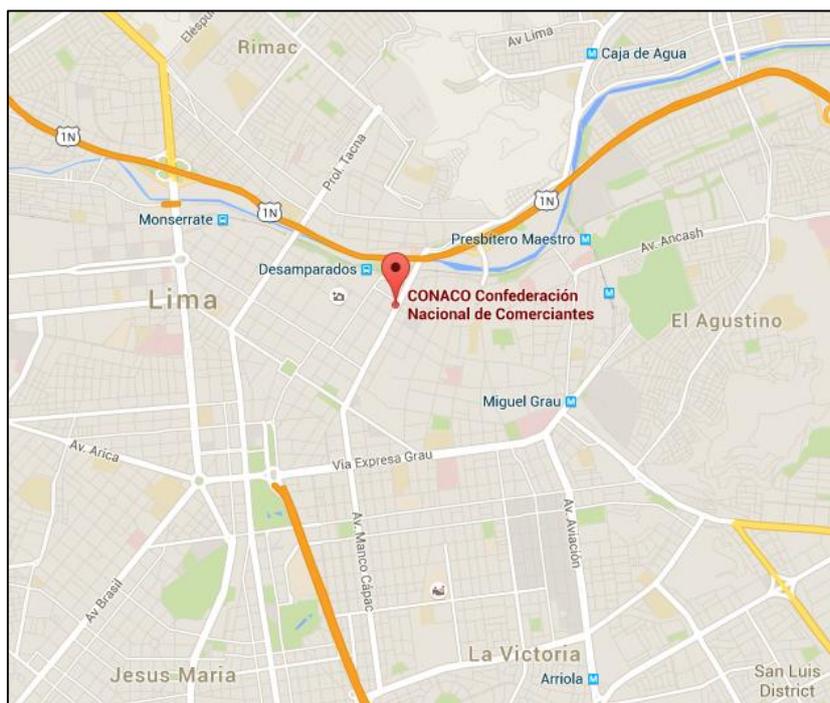
**Tabla 7: Promedio anual de las concentraciones de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) por estación en Lima Metropolitana y el Callao (µg/m<sup>3</sup>).**

Estación / Año	Conaco	Callao	Hipólito Unanue	María Auxiliadora	Santa Luzmila	Promedio
2000	126.75	19.82	32.39	22.67	24.88	45.30
2001	75.83	13.25	25.85	15.55	27.35	31.57
2002		12.27	22.80	10.49	20.98	16.63
2003	110.09	25.29	36.09	18.71	18.18	41.67
2004	83.94	7.18	30.45	15.86	46.13	36.71
2005	54.51	13.12	30.35	14.61	29.41	28.40
2006	56.55	17.32	26.22	19.80	64.19	36.82
2007	75.18	12.41	16.91	26.17	31.92	32.52
2008	39.14	9.98	15.21	59.26	17.42	28.20
2009	20.14	7.43	9.87	34.01	21.69	18.63
2010		8.00	11.10	12.40	11.55	10.76
2011		8.60	7.72	11.49	4.35	8.04
2012		11.04	14.29	13.95	5.43	11.18
2013	9.15	7.53		8.32	27.37	13.09

FUENTE: DIGESA, 2015.

#### **4.1.1. Estación CONACO**

La primera estación a evaluar es la de CONACO, que comprende la zona centro de la ciudad de Lima. En la Figura 15 se presenta la ubicación de dicha estación, entre los distritos de Lima, Rímac y La Victoria.



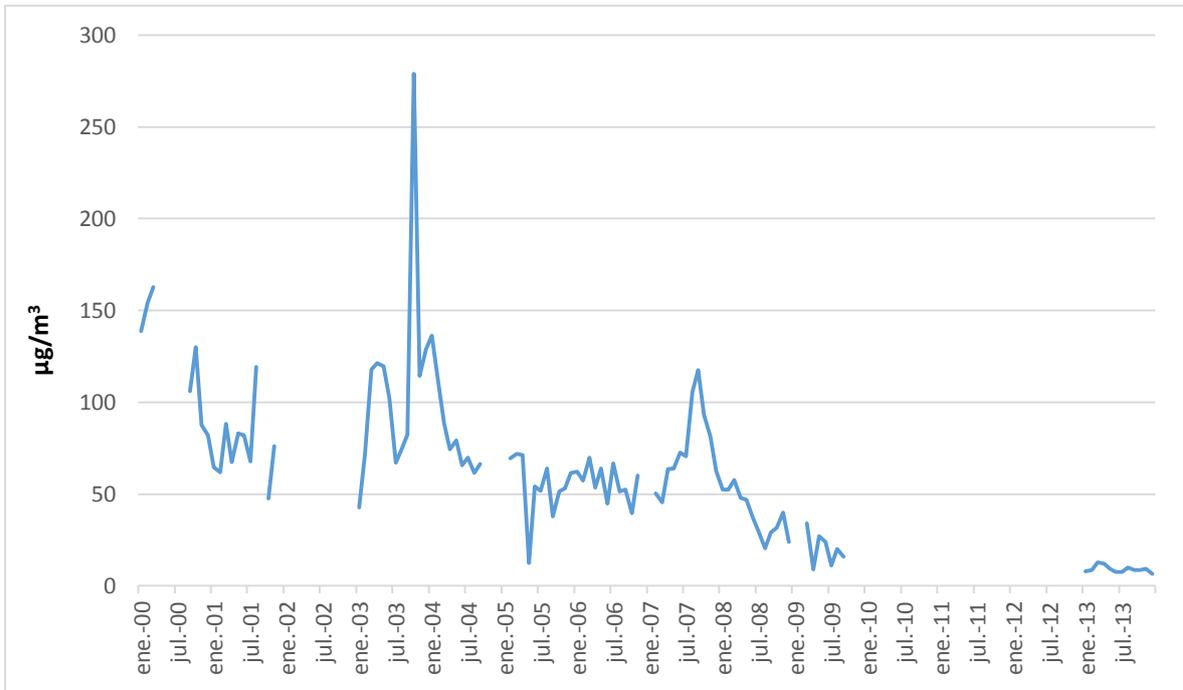
**Figura 15: Ubicación de la estación de monitoreo CONACO**

FUENTE: Elaboración propia.

Como se presenta en la Figura 16, los registros recopilados comprende el periodo de enero del 2000 a diciembre del 2013. Como se mencionó, debido a los sesgos es que la gráfica contiene espacios donde no se tienen datos registrados (no se cuenta con registros del año 2002, 2010, 2011 y 2012).

La mayor concentración registrada en el periodo de estudio fue en octubre del 2003, con una concentración de  $278.77 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , mientras que la menor fue de  $6.55 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en el mes de diciembre del 2013.

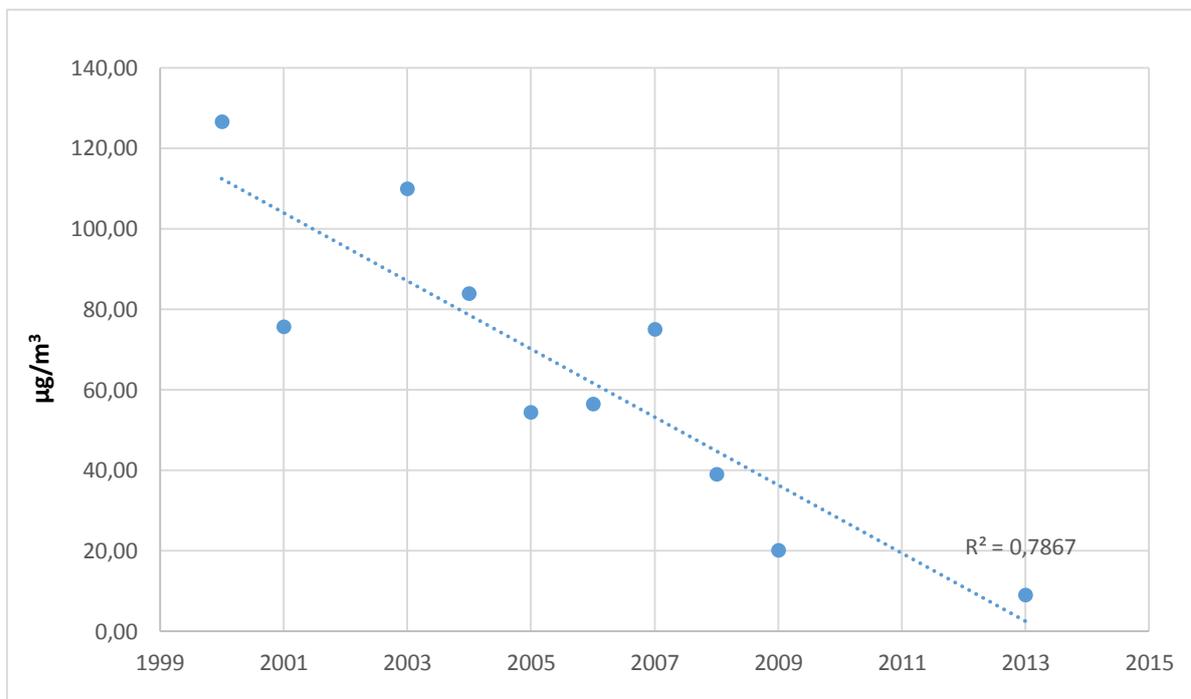
Si bien los datos se encuentran con una dispersión a lo largo del tiempo, la tendencia que siguen es a la disminución de las concentraciones, con un coeficiente de correlación de  $R^2=0.5045$ . Si se descarta dicho valor máximo (octubre 2003) el coeficiente de correlación variará a  $R^2=0.6127$ , que indica una mayor correlación entre las variables, suponiendo que con el transcurrir de dicho periodo de tiempo, las concentraciones de dióxido de azufre disminuyeron.



**Figura 16: Concentraciones mensuales de SO<sub>2</sub> en la estación de monitoreo de Lima Centro, CONACO**

FUENTE: Elaboración propia, con los datos del DIGESA.

Conforme a la Figura 17, las concentraciones promedio anuales presentan una más clara disminución de las concentraciones de dióxido de azufre con el transcurrir del tiempo en el periodo de estudio, con un coeficiente de correlación de  $R^2 = 0.7867$ , con una máxima concentración de  $126.75 \mu\text{g}/\text{m}^3$  para el año 2000 y el menor para el 2013, con  $9.15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

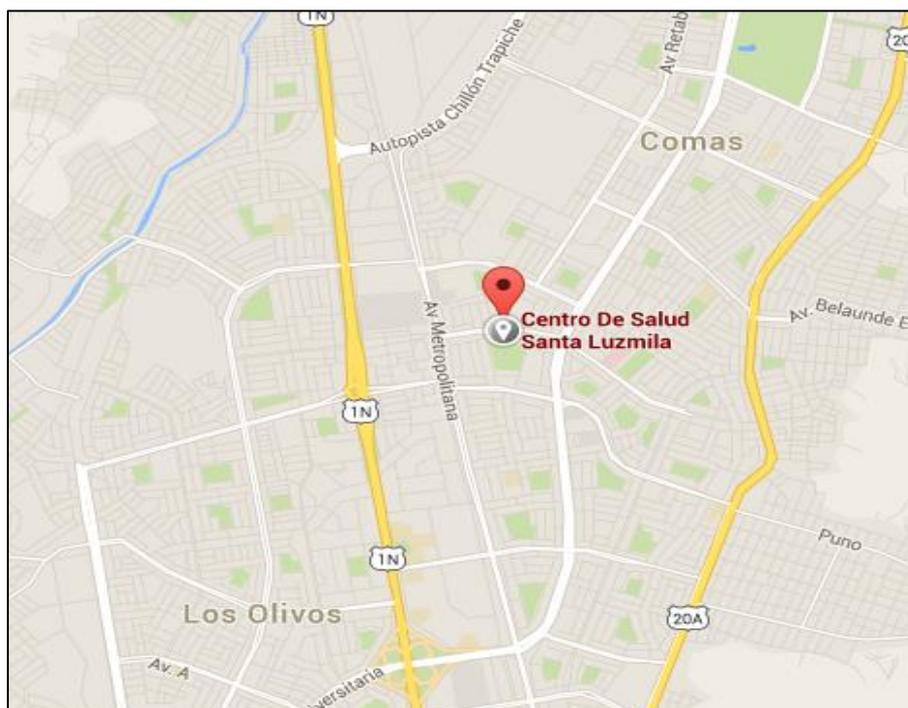


**Figura 17: Concentraciones anuales de SO<sub>2</sub> en la estación de monitoreo de Lima Centro, CONACO**

FUENTE: Elaboración propia, con los datos del DIGESA.

#### 4.1.2. Estación C.S. Santa Luzmila

La segunda estación evaluada es C.S. SANTA LUZMILA, que comprende la zona norte de la ciudad de Lima. En la Figura 18 se presenta la ubicación de dicha estación, entre los distritos de Comas y Los Olivos.

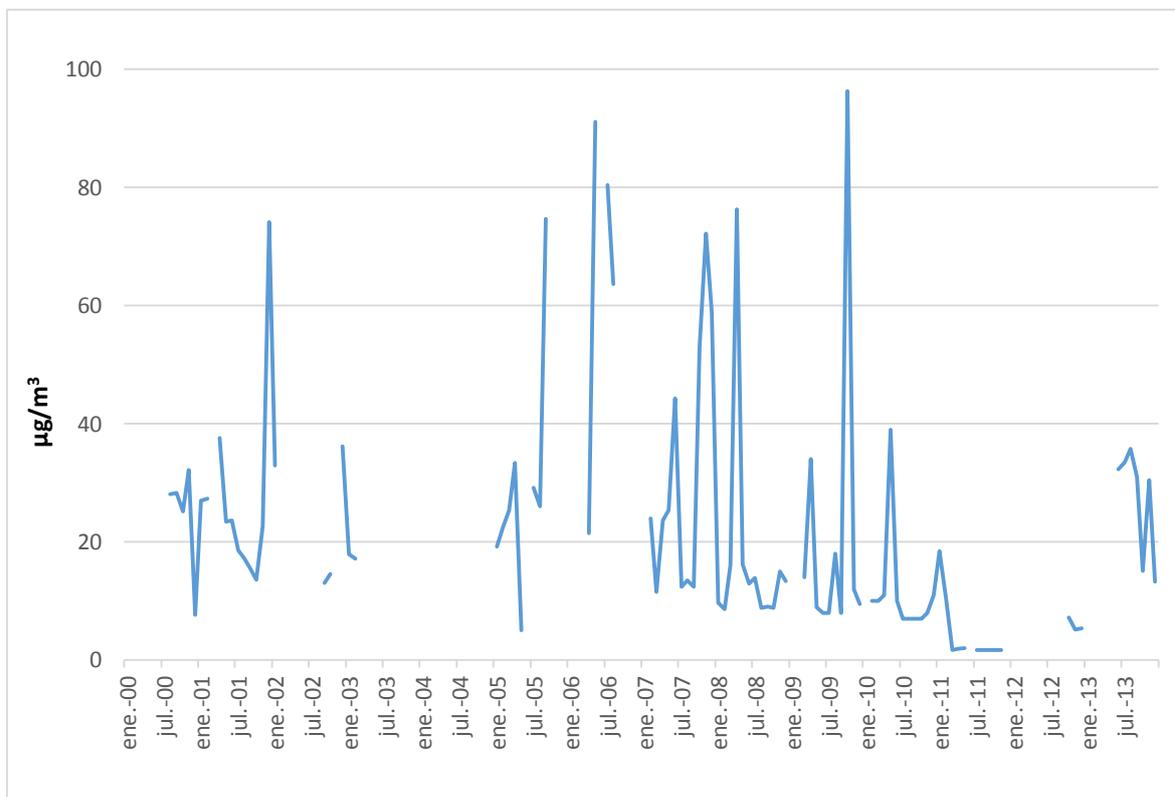


**Figura 18: Ubicación de la estación de monitoreo C.S. Santa Luzmila**

FUENTE: Elaboración propia.

Como se observa en la Figura 19 los registros mensuales recopilados desde enero del 2000 a diciembre del 2013 presenta un comportamiento bastante irregular. Para esta estación los sesgos o falta de registros no son tan pronunciados en un periodo de tiempo moderado. La ausencia de datos se ve más pronunciada en los periodos 2003 y 2004 (4 datos registrados de 24 posibles), en el año 2006 (4 datos registrados de 12 posibles) y para el año 2012 (3 datos registrados de 12 posibles).

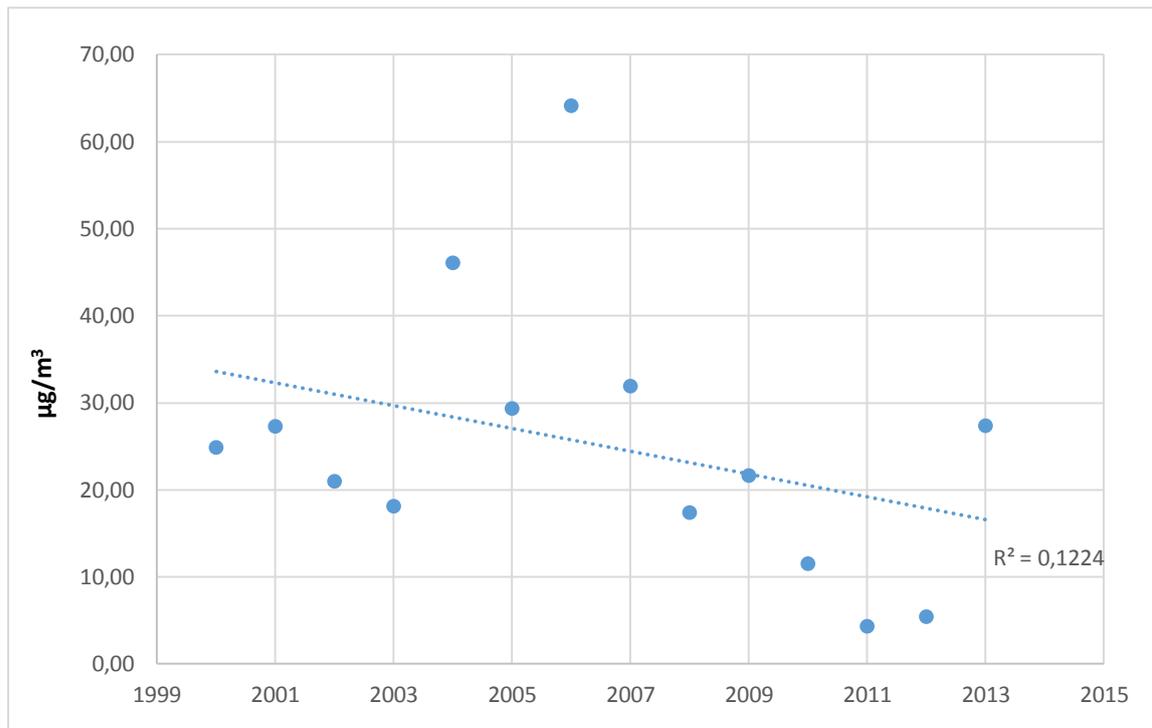
La mayor concentración registrada en el periodo de estudio fue en octubre del 2009, con una concentración de  $96.31 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , mientras que la menor fue de  $1.71 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en el mes de agosto y setiembre del 2011.



**Figura 19: Concentraciones mensuales de SO<sub>2</sub> en la estación de monitoreo de Lima Norte, C.S. Santa Luzmila**

FUENTE: Elaboración propia, con los datos del DIGESA.

En este caso se aprecia una considerable dispersión de las concentraciones a lo largo del tiempo para el periodo de estudio; sin embargo, como se muestra en la Figura 20, el análisis de los promedios anuales muestra una tendencia a la disminución de las concentraciones, con un coeficiente de correlación mínimo de  $R^2=0.1224$ . Retirando los valores muy alejados de la línea de tendencia (valores de los años 2004, 2006 y 2013) el coeficiente de correlación aumentaría al valor de  $R^2=0.4506$ , que indica una mayor correlación entre las variables, suponiendo que con el transcurrir de dicho periodo de tiempo, las concentraciones de dióxido de azufre disminuyeron. El valor para el año 2006 tiene un valor diferente al resto de los datos y fuera del rango de la tendencia que mantiene ese comportamiento. Para dicho año solo se contó con 4 registros mensuales, de los cuales 3 eran de alto valor y los cuales hicieron que la concentración promedio anual sea mayor a los  $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Como se mencionó anteriormente, este año es uno de los que ha sufrido mayor falta de datos para esta estación.

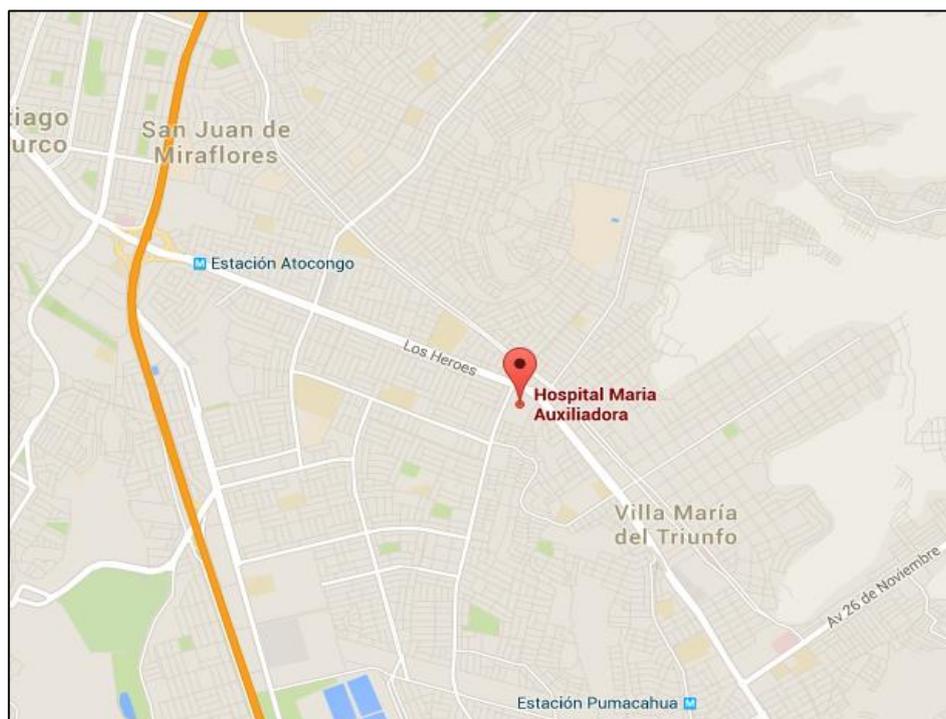


**Figura 20: Concentraciones anuales de SO<sub>2</sub> en la estación de monitoreo de Lima Norte, CS Santa Luzmila**

FUENTE: Elaboración propia, con los datos del DIGESA.

#### 4.1.3. Estación del hospital María Auxiliadora

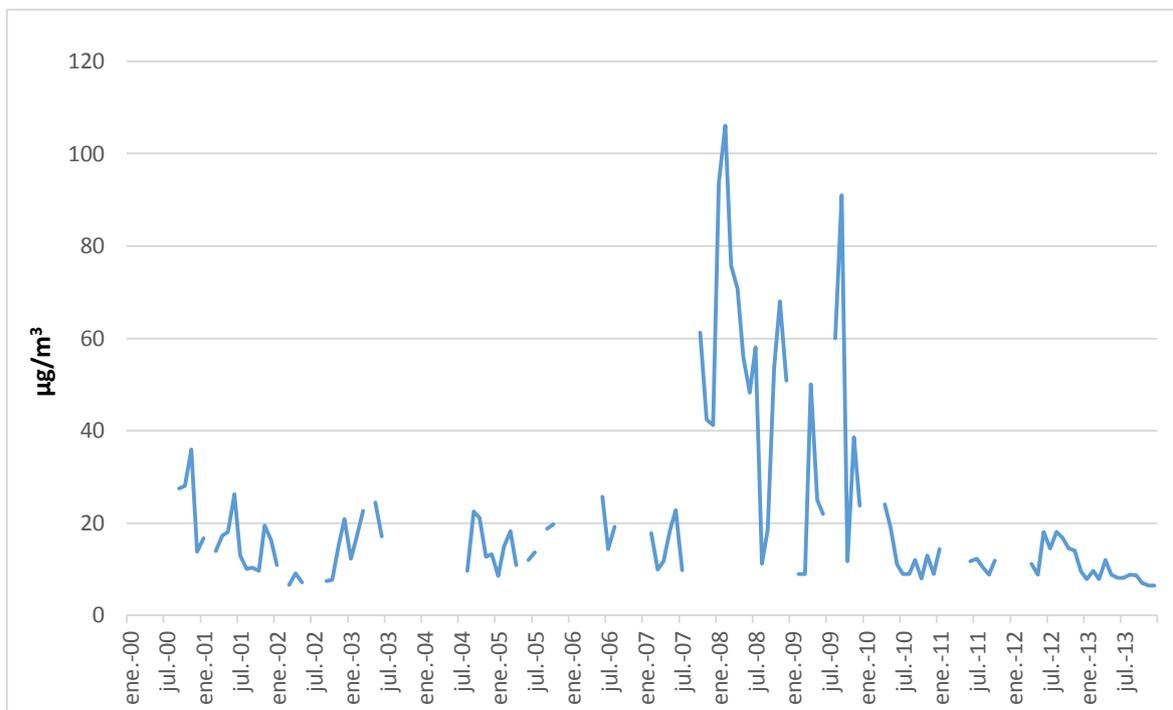
La tercera estación evaluada es la del HOSPITAL MARÍA AUXILIADORA, que comprende la zona sur de la ciudad de Lima. En la Figura 21 se presenta la ubicación de dicha estación, entre los distritos de San Juan de Miraflores y Villa María del Triunfo.



**Figura 21: Ubicación de la estación de monitoreo del Hospital María Auxiliadora.**

FUENTE: Elaboración propia.

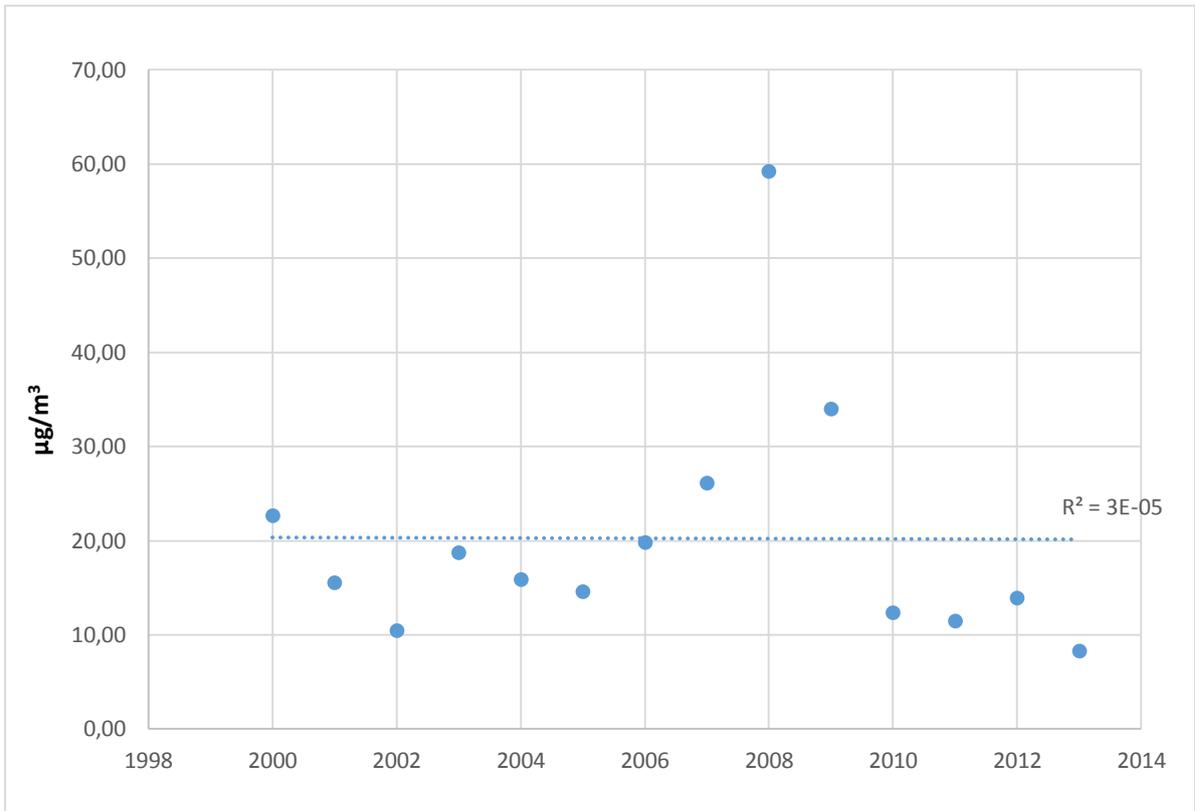
En la Figura 22 se observan los datos recopilados desde enero del 2000 a diciembre del 2013. Para esta estación se presentan sesgos en tiempos determinados, especialmente a inicios del año 2000 y se prolonga hasta mediados del mismo año; otro periodo sin registros ocurre desde mediados del año 2003 hasta mediados del 2004 y algunos meses para los años 2005 y 2006. Así mismo, la mayor concentración registrada en el periodo de estudio fue en febrero del 2008, con una concentración de  $106.11 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , mientras que la menor fue de  $6.41 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en el mes de noviembre del 2013.



**Figura 22: Concentraciones mensuales de SO<sub>2</sub> en la estación de monitoreo de Lima Sur, Hospital María Auxiliadora.**

FUENTE: Elaboración propia, con los datos del DIGESA.

Como se observa en la Figura 23, al igual que en la estación de Santa Luzmila se aprecia una dispersión de las concentraciones con valores por debajo de los 40 µg/m<sup>3</sup> y con un apreciable aumento en el periodo comprendido del 2008 al 2010; de todas maneras, en el análisis de los promedios anuales no se llega a diferenciar una clara tendencia pero que, sin embargo, está, con un valor de  $R^2=0.00003$ , muy próximo a 0 y que no indica una clara disminución de las concentraciones en el periodo en estudio. Los valores en picos máximos causan estas interferencias ya que salen de la ligera tendencia que siguen los demás datos, que es a la disminución. Mediante una evaluación y retirando los valores muy alejados de la línea de tendencia (valores de los años 2007, 2008 y 2009) el coeficiente de correlación aumentaría al valor de  $R^2 = 0.3907$ , que indica una mayor correlación entre las variables, suponiendo que con el transcurrir de dicho periodo de tiempo, las concentraciones de dióxido de azufre disminuyeron. Aunque no es una relación de variables representativa, se podría tomar con un valor de referencia para entender la tendencia de las concentraciones.

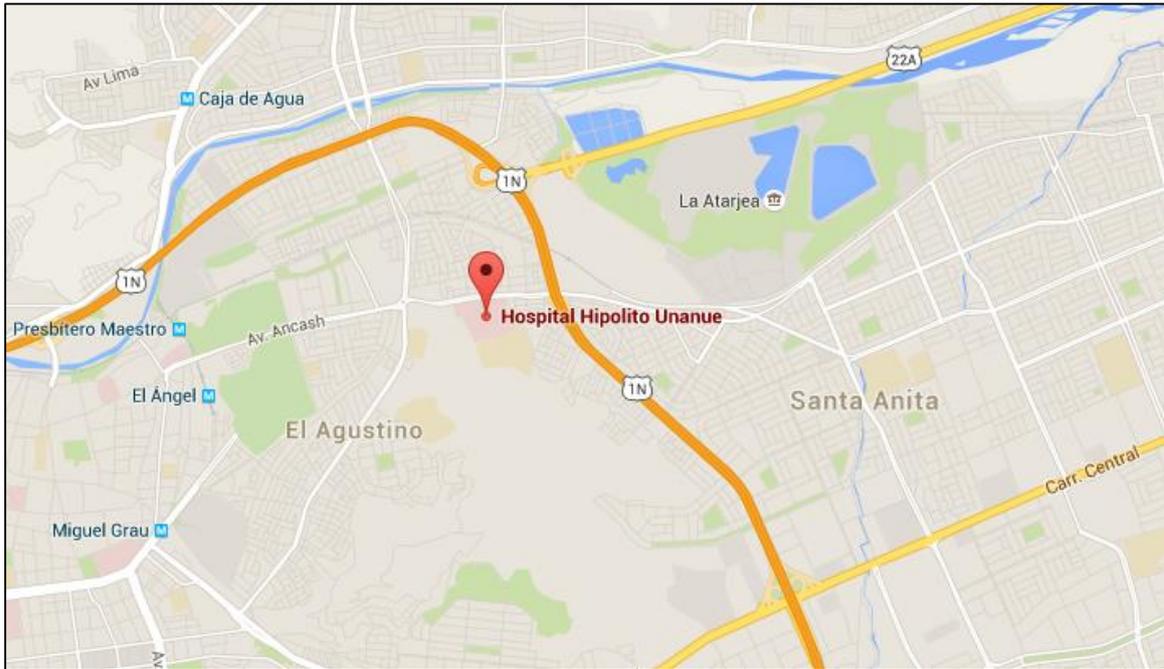


**Figura 23: Concentraciones anuales de SO<sub>2</sub> en la estación de monitoreo de Lima Sur, Hospital María Auxiliadora.**

FUENTE: Elaboración propia, con los datos del DIGESA.

#### 4.1.4. Estación del hospital Hipólito Unanue

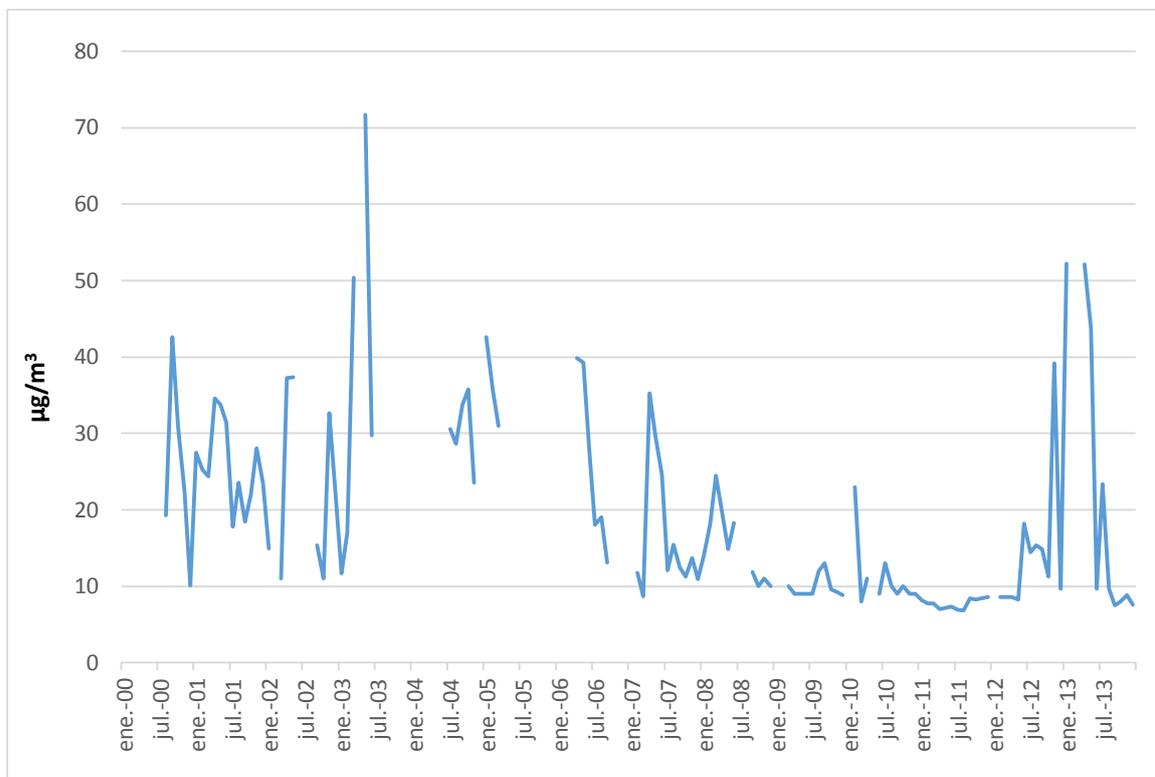
La cuarta estación evaluada es la del HOSPITAL HIPÓLITO UNANUE, que comprende la zona este de la ciudad de Lima. En la Figura 24 se presenta la ubicación de dicha estación, entre los distritos de El Agustino y Santa Anita.



**Figura 24: Ubicación de la estación de monitoreo del Hospital Hipólito Unanue**

FUENTE: Elaboración propia.

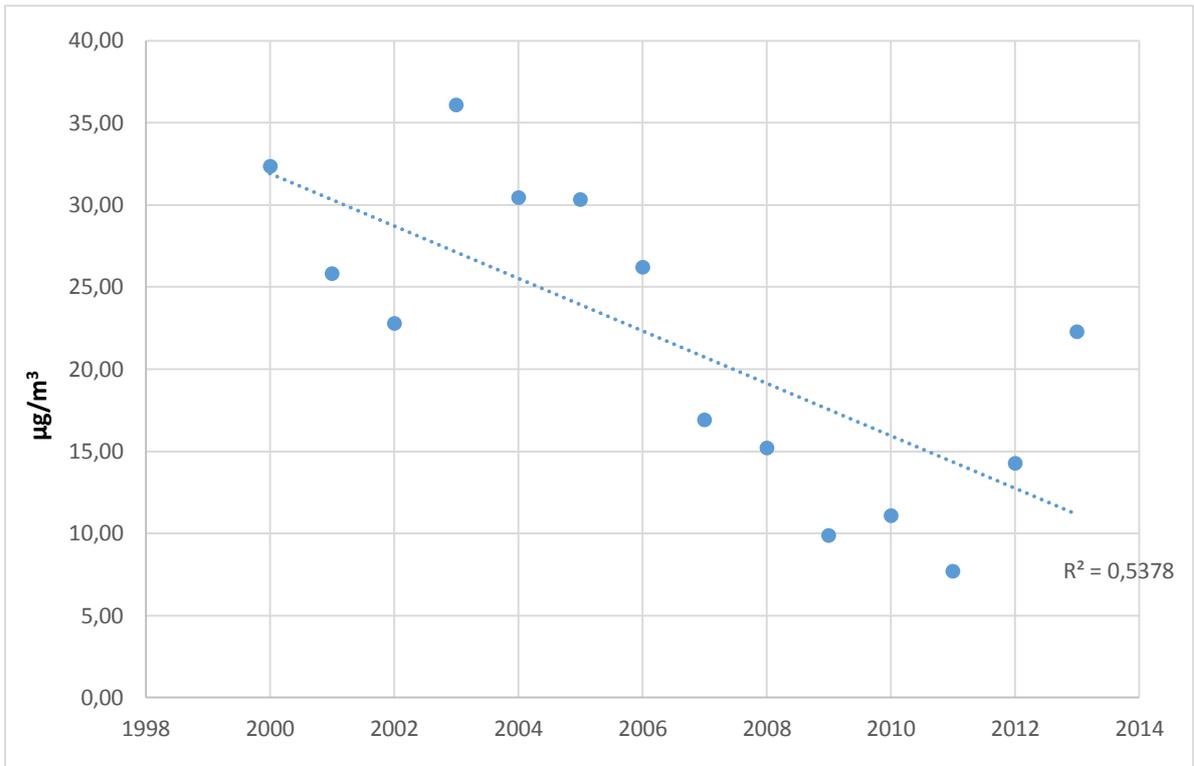
En la Figura 25 se observan los datos recopilados desde enero del 2000 a diciembre del 2013. Los resultados son variables, manteniéndose las concentraciones por debajo de  $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . La ausencia de datos más evidente se puede apreciar nuevamente en el periodo 2003 y 2004, y con pequeños sesgos dispersos en los años 2005 y 2006. Justamente, antes de este periodo 2006, se tenían registros dispersos, con picos máximos en algunas temporadas y que no presentaban alguna tendencia diferenciada. Pasado este año, las concentraciones tendieron a disminuir en un tiempo más prolongado con unos picos máximos a fines del periodo de estudio, para fines del 2012 y principios del 2013. Así mismo, la mayor concentración registrada en el periodo de estudio fue en mayo del 2003, con una concentración de  $71.65 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , mientras que la menor fue de  $6.83 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en el mes de agosto del 2011.



**Figura 25: Concentraciones mensuales de SO<sub>2</sub> en la estación de Lima Este, Hospital Hipólito Unanue**

FUENTE: Elaboración propia, con los datos del DIGESA.

En el análisis de los promedios anuales, como se muestra en la Figura 26, se llega a diferenciar una tendencia a la reducción con un valor de  $R^2=0.5378$ , y que indica una disminución de las concentraciones en el periodo en estudio. Descartando el valor alejado de la línea de tendencia, (año 2013) el coeficiente de correlación aumentaría al valor de  $R^2=0.692$ , lo que favorece a la correlación entre las variables de concentración y tiempo, suponiendo que con el transcurrir de dicho periodo de tiempo, las concentraciones de dióxido de azufre disminuyeron.

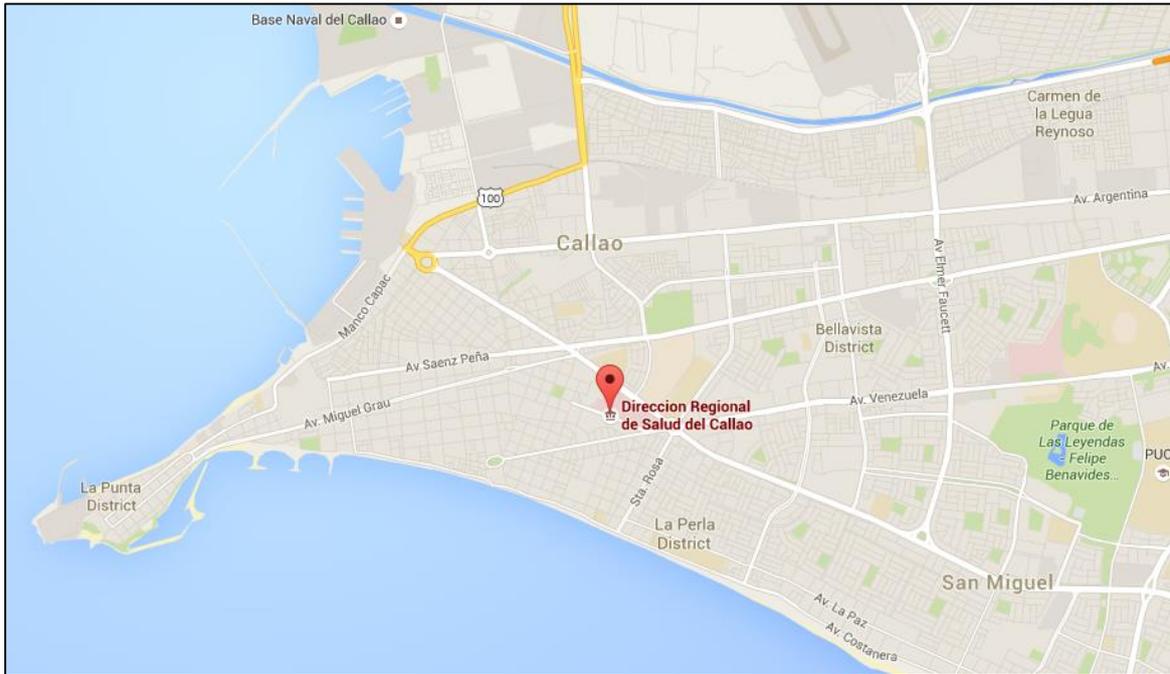


**Figura 26: Concentraciones anuales de SO<sub>2</sub> en la estación de monitoreo de Lima Este, Hospital Hipólito Unanue**

FUENTE: Elaboración propia, con los datos del DIGESA.

#### 4.1.5. Estación de la dirección de salud I Callao

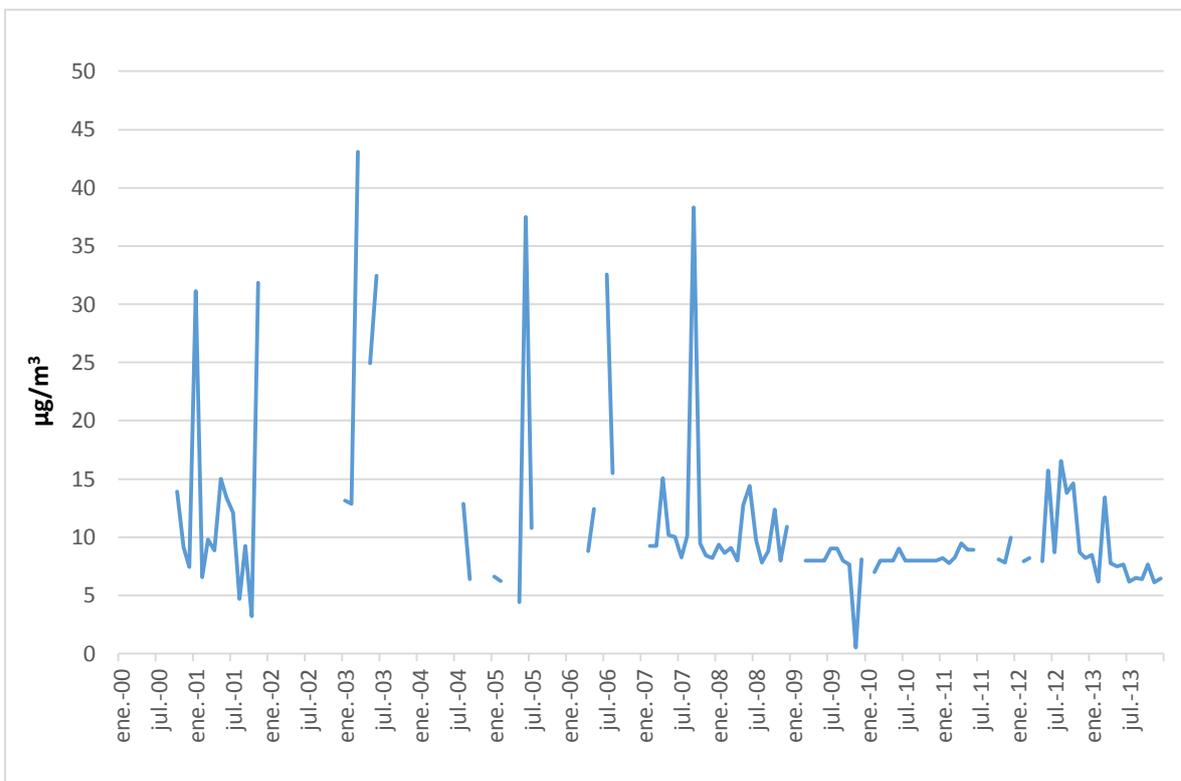
La última estación evaluada es la DIRECCIÓN DE SALUD I CALLAO, que no está referenciada como alguna zona, solo como Callao. En la Figura 27 se presenta la ubicación de dicha estación, en la provincia constitucional del Callao.



**Figura 27: Ubicación de la estación de monitoreo de la Dirección de Salud I Callao.**

FUENTE: Elaboración propia.

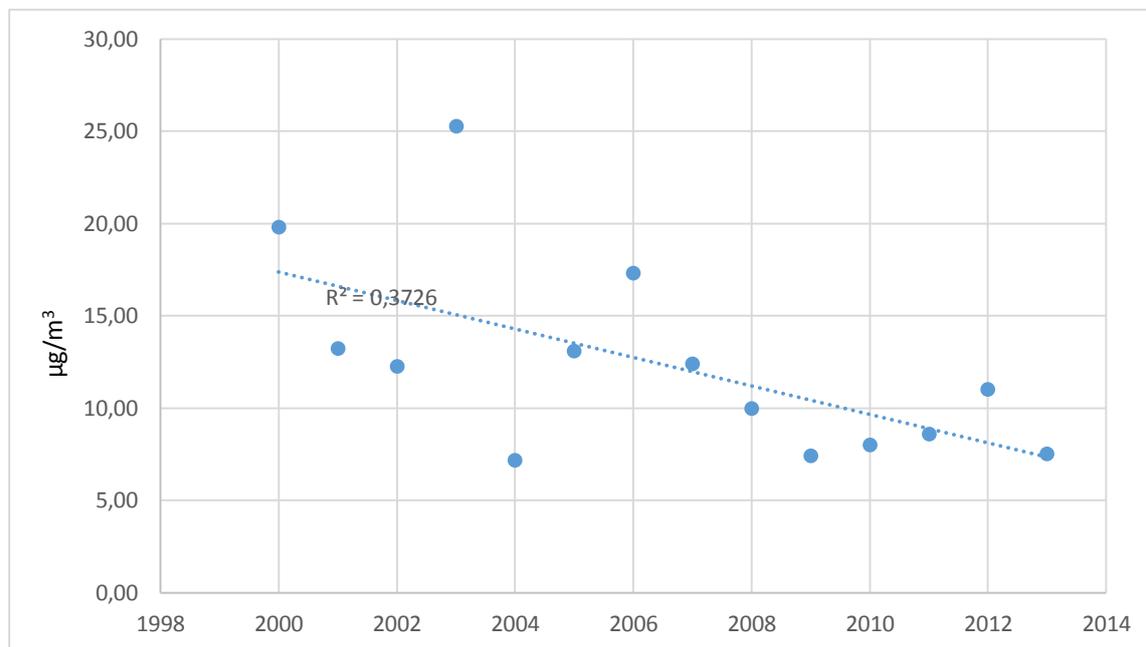
En la Figura 28 se observan los datos recopilados que parte desde el año 2000 hasta 2013. Si bien las concentraciones se mantienen por debajo de los  $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , se aprecia una gran variabilidad con picos máximos, abarcando desde el año 2000 al 2008, a partir del cual los datos se van normalizando y donde se cuenta con mayor registro. Los mayores sesgos y falta de datos ocurre al inicio del periodo, en el año 2000, para luego presentarse en el año 2002 y 2003, y en una menor proporción en el año 2004, 2005 y 2006. Para dicho periodo de estudio, la mayor concentración registrada fue en marzo del 2003, con  $43.07 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , mientras que la menor fue de  $0.54 \mu\text{g}/\text{m}^3$  en el mes de noviembre del 2009.



**Figura 28: Concentraciones mensuales de SO<sub>2</sub> en la estación de monitoreo de Callao**

FUENTE: Elaboración propia, con los datos del DIGESA.

Como se observa en la Figura 29 la línea de tendencia presenta coeficiente de correlación  $R^2=0.3726$ , por lo que se infiere que los resultados anuales tienden a la disminución respecto pasa el tiempo. Realizando los descartes correspondientes a los valores discordantes (año 2003 y 2004) y que se alejan de la línea de tendencia y reducen el factor de correlación, se obtiene un nuevo coeficiente  $R^2=0.5726$ , lo que favorece a la correlación entre las variables de concentración y tiempo, suponiendo que con el transcurrir de dicho periodo de tiempo, las concentraciones de dióxido de azufre disminuyeron.



**Figura 29: Concentraciones anuales de SO<sub>2</sub> en la estación de monitoreo de Callao.**

FUENTE: Elaboración propia, con los datos del DIGESA.

Para los periodos de fin de año, entre los meses de diciembre y noviembre, se observa que las condiciones meteorológicas, como el incremento de la temperatura y procesos de inversión térmica, o estabilidad de la atmósfera, que no son propicias para la ocurrencia de turbulencias del aire y que permita una mayor dispersión de contaminantes, hacen que las concentraciones de los contaminantes tienden a aumentar. Además, el comportamiento de los vientos de intensidad media débil y con una dirección SW, no generan un alto transporte de sustancias contaminantes, lo que hace q se concentren en las zonas de donde fueron emitidos. Así también se caracterizó por la inversión atmosférica con características muy estables y nubosidad que origino cielo cubierto. (SENAMHI, 2007)

Para el aumento en la concentraciones de marzo y abril se indica la intensificación de la nubosidad horaria baja y media, propia del desarrollo de la estación otoñal, el descenso de la temperatura media del aire; y vientos del cuadrante S y SW de intensidad predominantemente débil, que favorecieron en conjunto procesos de re-suspensión y limitaron la dispersión, por lo que las concentraciones altas en los núcleos de las principales zonas críticas. (SENAMHI, 2007)

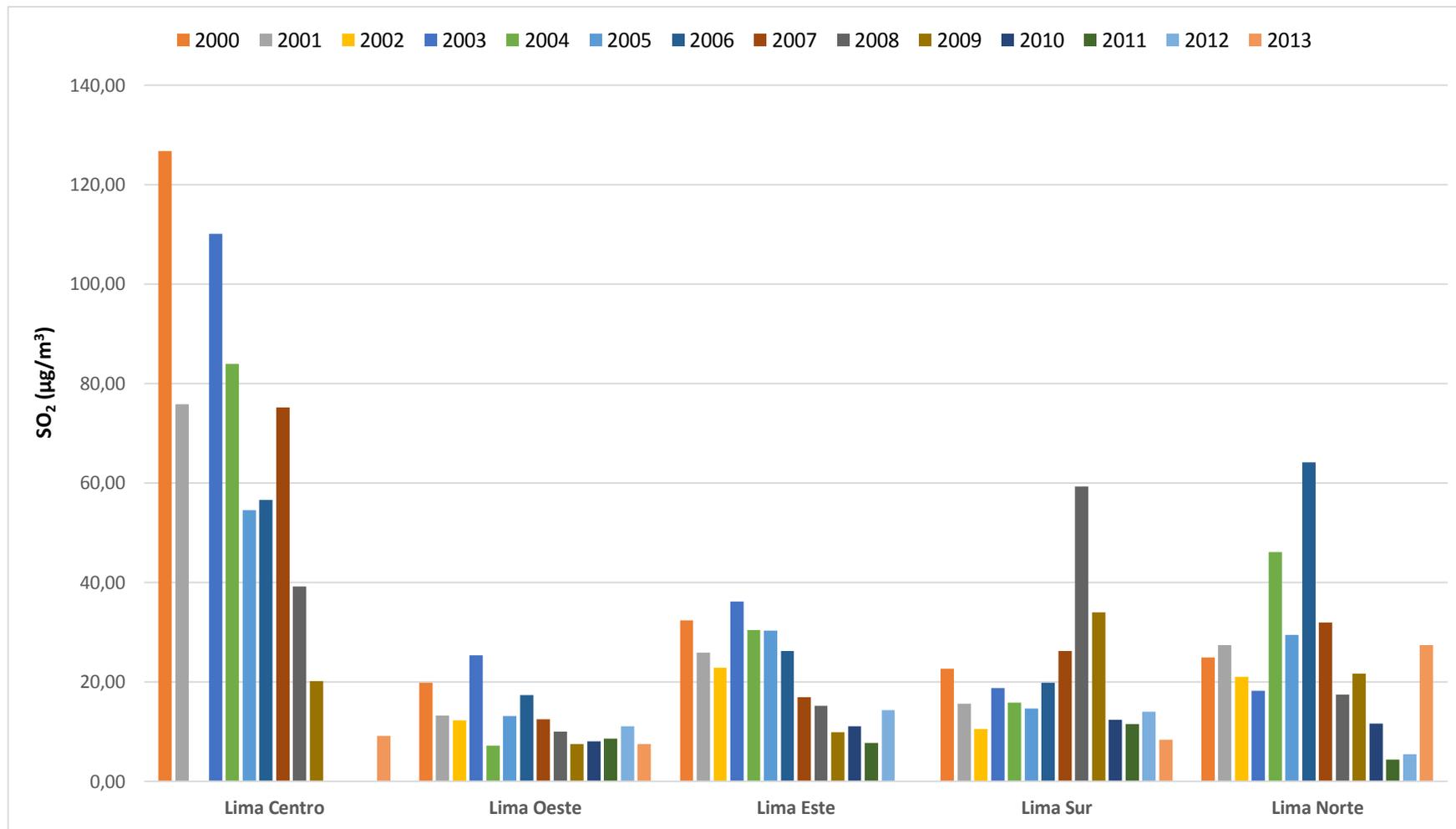
Para fines de la estación de invierno y principio de primavera (setiembre, octubre) se presentan condiciones meteorológicas que ocasionaron el incremento de la cubierta de

nubosidad estratiforme baja sobre todos los distritos, la temperatura del aire alcance valores mínimos y la humedad relativa los máximos del ciclo anual. El campo de vientos regionales en los niveles bajos de la atmósfera muestra una menor intensidad de los vientos del S y SE y un debilitamiento de los flujos del oeste en altas latitudes. Se generaron condiciones meteorológicas de medianas a fuertemente estables, con un viento débil y un aire frío que no tiende a desplazarse verticalmente, lo que concentra los contaminantes en la parte baja. (SENAMHI, 2012). Además de la ausencia de precipitaciones en la mayoría de los meses que no ha producido el “lavado” de las partículas.

Teniendo dichas condiciones meteorológicas, también se tiene en cuenta el incremento de industrias, mayor carga por parte del parque automotor y el aumento de la población, sin un ordenamiento territorial adecuado para algunas zonas, lo que origina el aumento de los contaminantes por las diferentes actividades económicas que se puedan desarrollar en ellas, el uso de diversos energéticos, bienes y servicios, y que contribuyeron al deterioro de la calidad del aire, para determinadas zonas y determinados periodos, sin dejar de mencionar episodios locales de contaminación, provenientes de fuentes puntuales o de área. Si bien Lima no posee una compleja topografía, el incremento de los edificios y urbanizaciones, actúan como obstáculos que no permiten la dispersión de los contaminantes y que también puede afectar de manera positiva a las concentraciones en la atmósfera.

#### **4.1.6. Análisis de datos promediados**

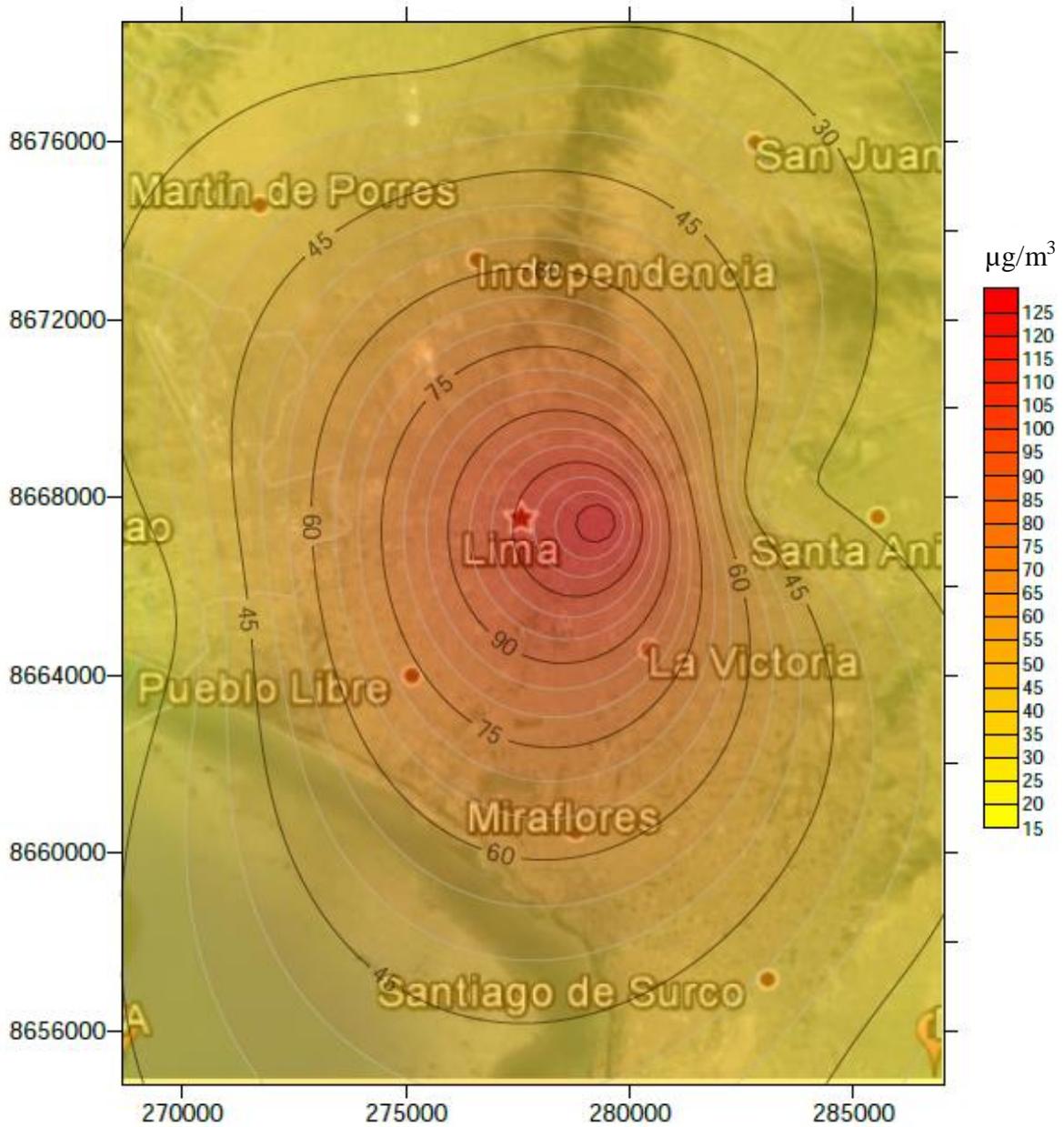
Como se muestra en la figura 30, los datos de concentraciones de SO<sub>2</sub> fueron representados de manera anual y de todas las estaciones de monitoreo para tener una mejor apreciación del comportamiento de dicha variable en el periodo de estudio. Se observa que las mayores concentraciones se han encontrado en la estación de Lima centro, posiblemente por la mayor actividad que en esa zona se realiza, como transporte, servicios, comercios, etc.; y las menores concentraciones en el Callao, posiblemente debido a su cercanía al mar y la influencia de las brisas marinas, por lo que hay mayor dispersión de contaminantes. Las estaciones de Lima sur y norte son las que presentan mayor variación en sus datos registrados, sin embargo en el periodo de los últimos 6 años arrojan una tendencia significativa a la reducción, al igual que Lima este.



**Figura 30: Concentración anual del dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) en las 5 estaciones de monitoreo de la ciudad de Lima, de enero 2000 a diciembre 2013.**

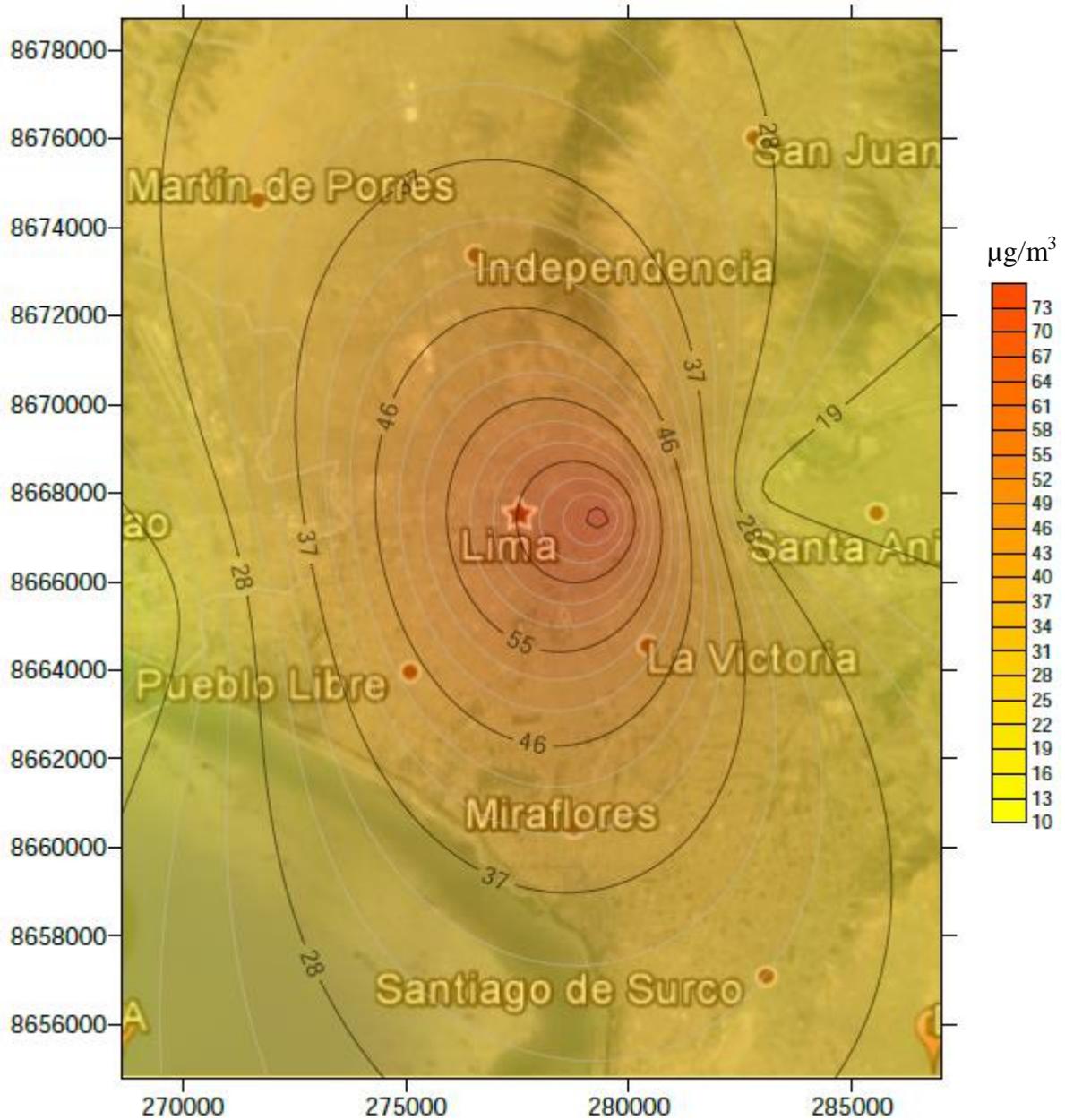
FUENTE: Elaboración propia, con los datos del DIGESA.

Respecto a su distribución espacial y su comportamiento en el tiempo, se tiene lo mostrado en la figura 31, 32 y 33, las cuales permiten hacer una comparación entre los años 2000, 2007 y 2014. Se observa que se tienen mayores concentraciones para el año 2000, localizado en mayor proporción en Lima centro y se va reduciendo hacia las demás zonas de norte, sur, este y Callao; mientras que para el año 2007 se aprecia el mismo comportamiento, que sin embargo son menores que las registradas en el 2000. Por último, los valores para el año 2014, indican que los mayores valores se encuentra en Lima norte, probablemente producto de la acción de los vientos característicos de Lima, que van en dirección SW provenientes de las brisas marinas y que llevan los contaminantes a las zonas del norte, o por las actividades industriales y de transporte que se puedan generar en dicho cono de la ciudad o episodios de contaminación local. Cabe resaltar, que de todas formas son concentraciones bajas que no superan el ECA aire y que están por debajo de los registros encontrados para los años anteriores.



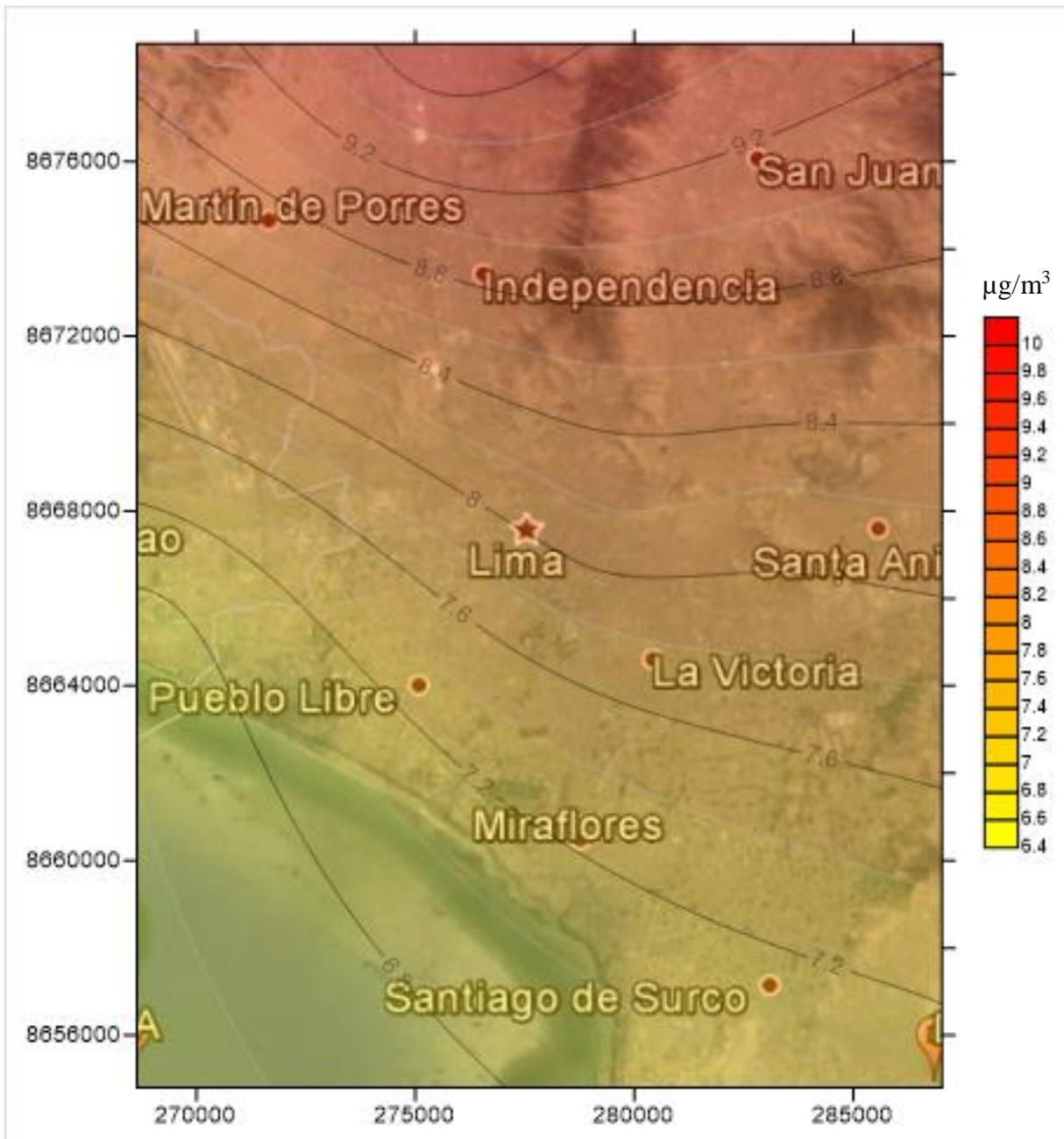
**Figura 31: Comportamiento espacial de las concentraciones de dióxido de azufre, 2000.**

FUENTE: Elaboración propia, con los datos del DIGESA.



**Figura 32: Comportamiento espacial de las concentraciones de dióxido de azufre, 2007.**

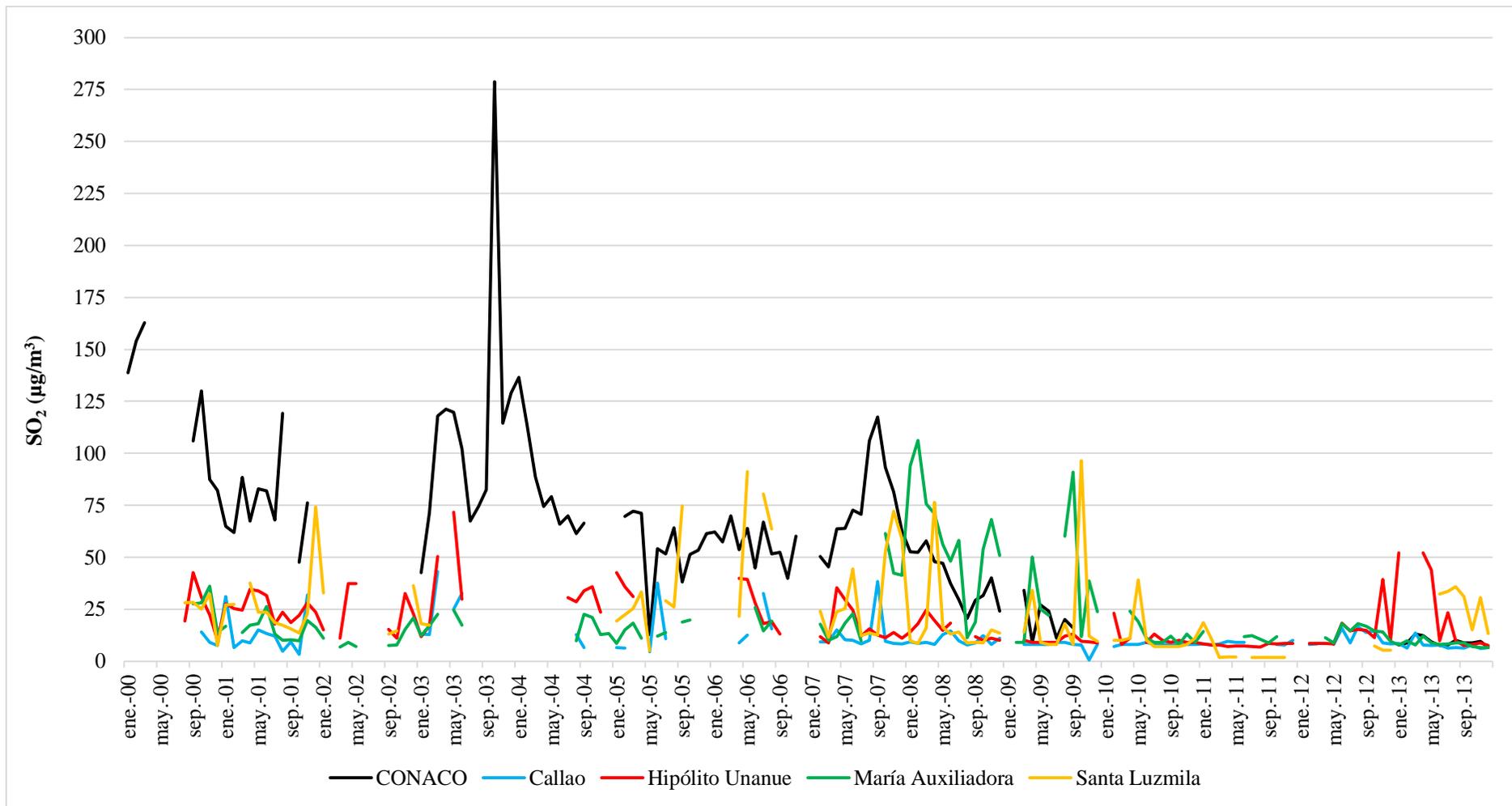
FUENTE: Elaboración propia, con los datos del DIGESA.



**Figura 33: Comportamiento espacial de las concentraciones de dióxido de azufre, 2014.**

FUENTE: Elaboración propia, con los datos del DIGESA.

Mientras que en la figura 34, los datos recopilados fueron promediados de manera mensual por estación de monitoreo e incorporados en una sola gráfica, que permita la comparación por cada estación. Así, se aprecia que en los inicios del periodo de estudio existe una mayor variabilidad entre los datos, observándose picos elevados en enero del 2000, abril del 2003 y el mayor de todos en octubre del 2003, con una concentración mayor a los  $275 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . En ciertos periodos no se cuenta con datos, aun cuando se hayan promediado los valores de las 5 estaciones, lo que da a denotar que para meses puntuales no hubo registros en ninguna de las estaciones de monitoreo de la DIGESA, caso de los meses de mayo y julio del 2000, junio y agosto del 2002, enero del 2007, enero del 2009, enero del 2010 y enero del 2012.



**Figura 34: Concentración mensual del dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) en las 5 estaciones de monitoreo de la ciudad de Lima, de enero 2000 a diciembre 2013.**

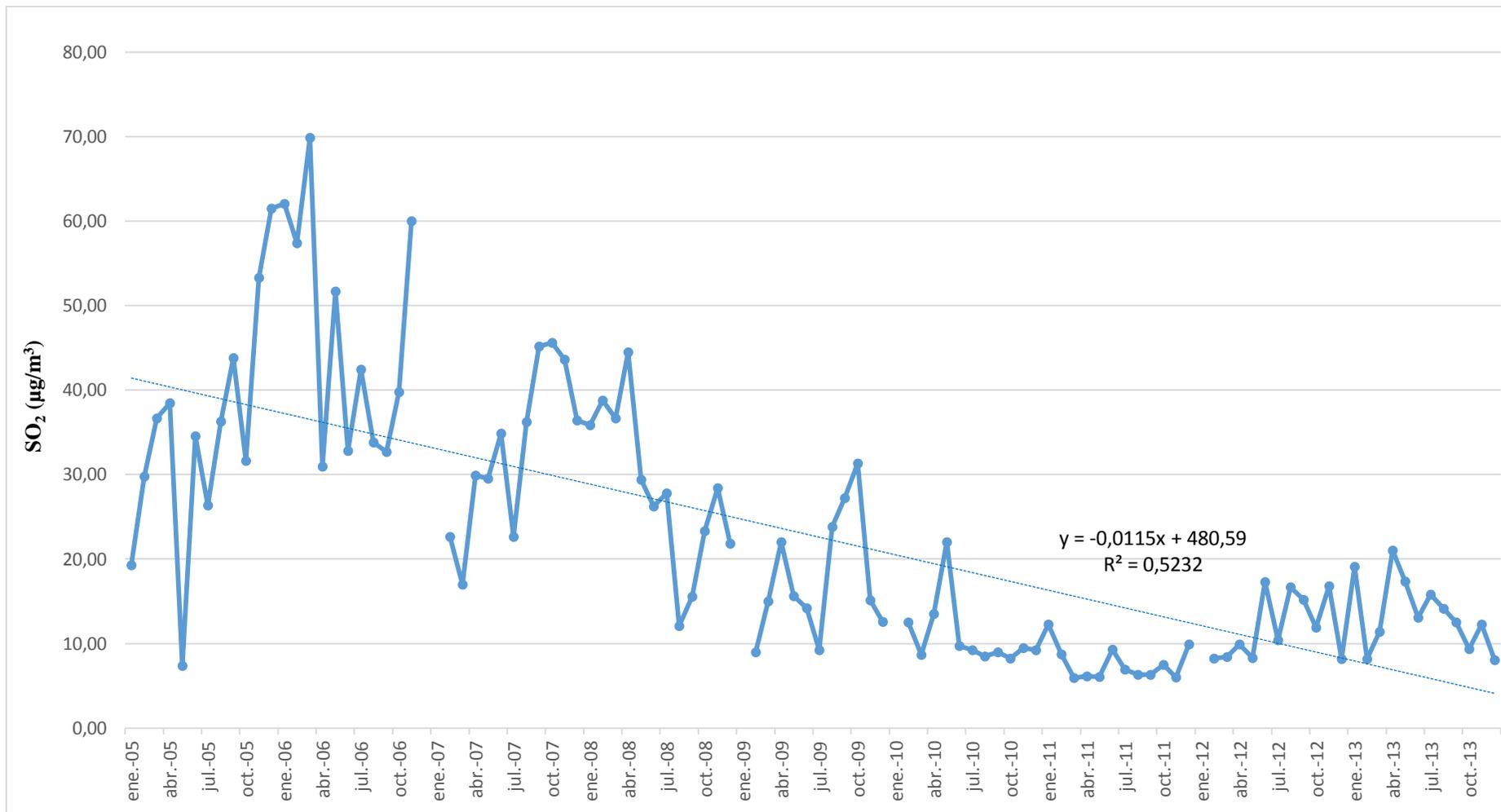
FUENTE: Elaboración propia, con los datos del DIGESA.

En una visión general, los años 2003 y 2004 comprenden el periodo con que menor cantidad de registros se cuenta, siendo la estación CONACO la única con datos continuos en dicho periodo, mas no las demás estaciones de monitoreo. Lo mismo ocurre a principios del 2000, el periodo entre mayo y setiembre del 2002, noviembre 2005 a abril 2006, octubre 2006 a febrero 2007.

Además, se observa que la estación CONACO, de la zona centro de Lima, presenta los valores más elevados respecto al parámetro en estudio, alcanzando valores por encima de los  $270 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ; los menores valores del parámetro se concentran en las estaciones del Callao e Hipólito Unanue, y los valores medio en las estaciones de María Auxiliadora y Santa Luzmila.

A partir del año 2010 se aprecia una ligera disminución de las concentraciones del dióxido de azufre en todas las estaciones, valores que se mantienen casi constantes por todo lo que resta del periodo de estudio, es decir hasta el 2013, exceptuando las estaciones de Hipólito Unanue y Santa Luzmila, periodo donde sus concentraciones alcanzaron entre  $25$  y  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , mucho mayores a comparación de las demás.

Según lo que se observa en la Figura 35, se optó por la reducción del periodo de estudio, asumiendo los valores que presenten menor variación y sigan manteniendo la tendencia descrita, además que en el periodo a elegir se cuenta con datos de las demás variables, es por ello se escoge el tiempo comprendido entre los años 2005 y 2013, registros que no presentan picos elevados tan altos y que siguen en la tendencia de la disminución de las concentraciones de la variable estudiada, salvo ciertos meses en los que se encuentran vacíos por falta de registros en las estaciones de monitoreo, como anteriormente se ha mencionado. En este caso, el coeficiente de correlación aumenta en un 54.93% llegando a un  $R^2 = 0.5232$ , lo que indica mayor correlación entre las variables, en el periodo 2005 y 2013, lo que a su vez genera un mejor análisis respecto a las demás variables, en las cuales se cuenta con registros a partir de ese periodo.



**Figura 35: Concentración promedio del dióxido de azufre. Periodo 2005 – 2013**

FUENTE: Elaboración propia, con los datos del DIGESA.

De manera general se tiene que las concentraciones de dióxido de azufre tienden a la reducción con el transcurrir del tiempo, y mediante la proyección obtenida,  $y = -0.0115x + 480.59$ , se aprecia que estas concentraciones seguirán disminuyendo por lo que no se tendrían problemas a futuro respecto a la mala calidad del aire.

Sin embargo, en un análisis de manera individual según el comportamiento observado del SO<sub>2</sub>, este podría ser dividido en 3 periodos diferenciados con determinadas características:

- Enero 2005 a marzo 2006: Tendencia al aumento, con un coeficiente de correlación significativo. ( $R^2 = 0.6655$ )
- Abril 2006 a diciembre 2011: Tendencia a la reducción, con un coeficiente de correlación significativo. ( $R^2 = 0.6797$ )
- Enero 2012 a diciembre 2013: Aumento, comportamiento irregular, con un coeficiente de correlación poco significativo. ( $R^2 = 0.284$ )

En este sentido, la expresión,  $y = 0.0069x - 273.48$ , indicaría una relación directa para el último periodo, 2012 y 2013, y una proyección a futuro arrojaría el aumento de las concentraciones de dióxido de azufre conforme pase el tiempo, producto de las actividades industriales y funcionamiento del parque automotor. Conforme a esto se agravaría la calidad del aire respecto a este contaminante, afectando principalmente a la salud de la población más vulnerable, en cuanto a enfermedades respiratorias se refiera.

## **4.2. CONTENIDO DE AZUFRE Y DEMANDA EN LOS COMBUSTIBLES DIÉSEL**

### **4.2.1. Contenido de azufre**

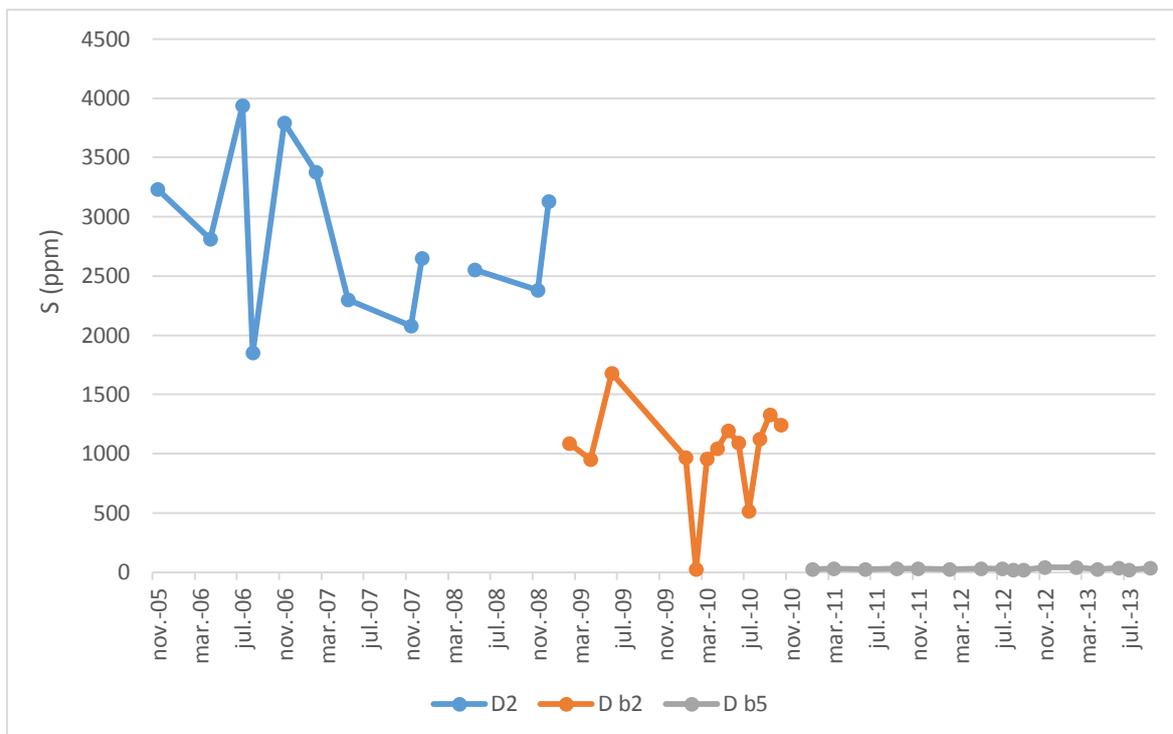
Según los registros solicitados y entregados por el Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (OSINERGMIN) (Ver Anexo 2) se aprecia que los monitoreos y seguimiento a la calidad del combustible, en especial al contenido de azufre en estos, se inició en determinados puntos de venta, refinerías y plantas de combustible a partir del 2005, intensificándose a partir del 2010

Mediante informe GFHL-UOE-1854-2014, el OSINERGMIN indica:

- Con relación a los resultados de Contenido de azufre (ppm) en Refinerías y Plantas de Abastecimientos para el período 2000 al 2004, se precisa que durante dicho periodo, OSINERGMIN efectuó labores de supervisión por control de calidad solo a los siguientes ensayos: Punto de Inflamación, Destilación e Índice de Cetano.
- Con relación a los resultados de Contenido de azufre (ppm) en los combustibles diésel en las estaciones de servicios de la ciudad de Lima, desde el año 2000 al 2010, se precisa que durante dicho periodo, OSINERGMIN efectuó las labores de supervisión por control de calidad relacionadas solo al siguiente ensayo: Punto de Inflamación.
- Las Refinerías y Plantas de Ventas que comercializan combustibles diésel en la ciudad de Lima, son: Refinería Conchán, Planta de Ventas Conchán, Planta de Ventas La Pampilla, Planta de Ventas Herco y Terminal Callao.

Por lo antes mencionado, no se cuenta con datos del contenido de azufre en los combustibles del periodo 2000 al 2004, periodos en los cuales se venía implementando la normativa para azufre en combustibles y las modificaciones de estándares de calidad ambiental para el parámetro dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>).

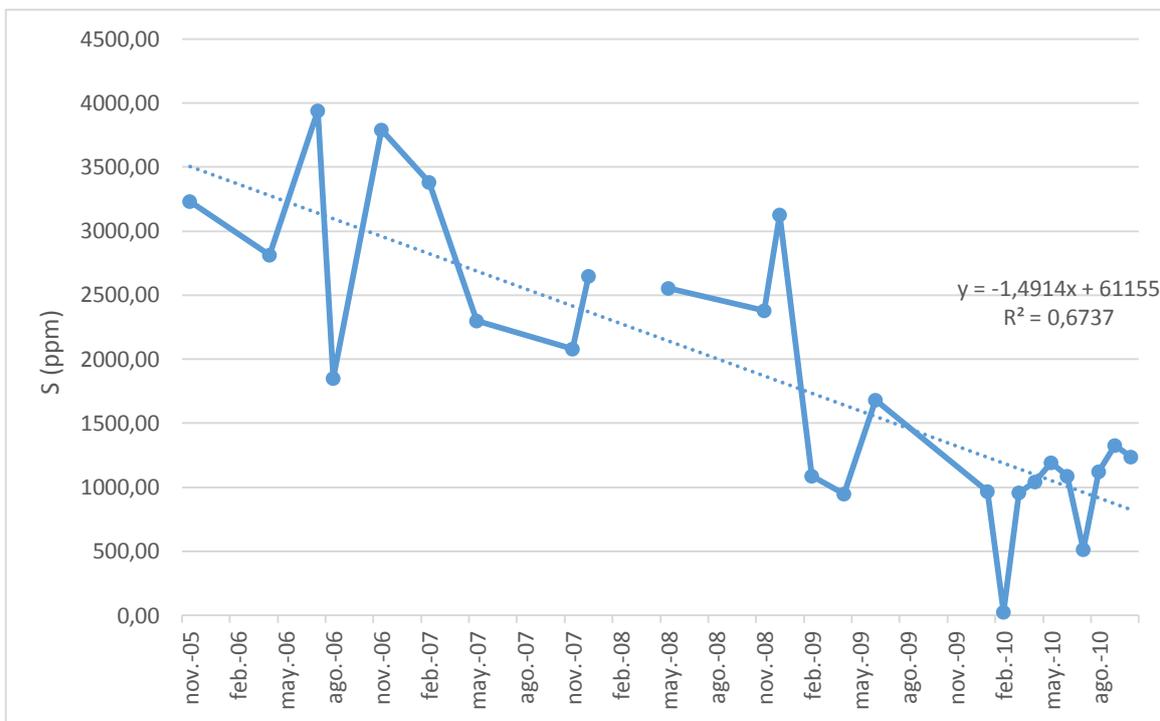
Como se observa en la Figura 36, se tuvo una comercialización de combustibles diésel con alto contenido de azufre desde el 2005 hasta el 2008, con valores que alcanzaban los 4760 ppm, un periodo de transición en los años 2009 y 2010, con una comercialización combustibles diésel DB2, y un último periodo con combustibles diésel DB5, los cuales fueron comercializados a partir del año 2011 al 2013, llegando hasta valores máximos de 44 ppm.



**Figura 36: Contenido de azufre en los diésel distribuidos en Lima y Callao, según su el tipo de diésel (2005 - 2013)**

FUENTE: Elaboración propia, con los datos de OSINERGMIN.

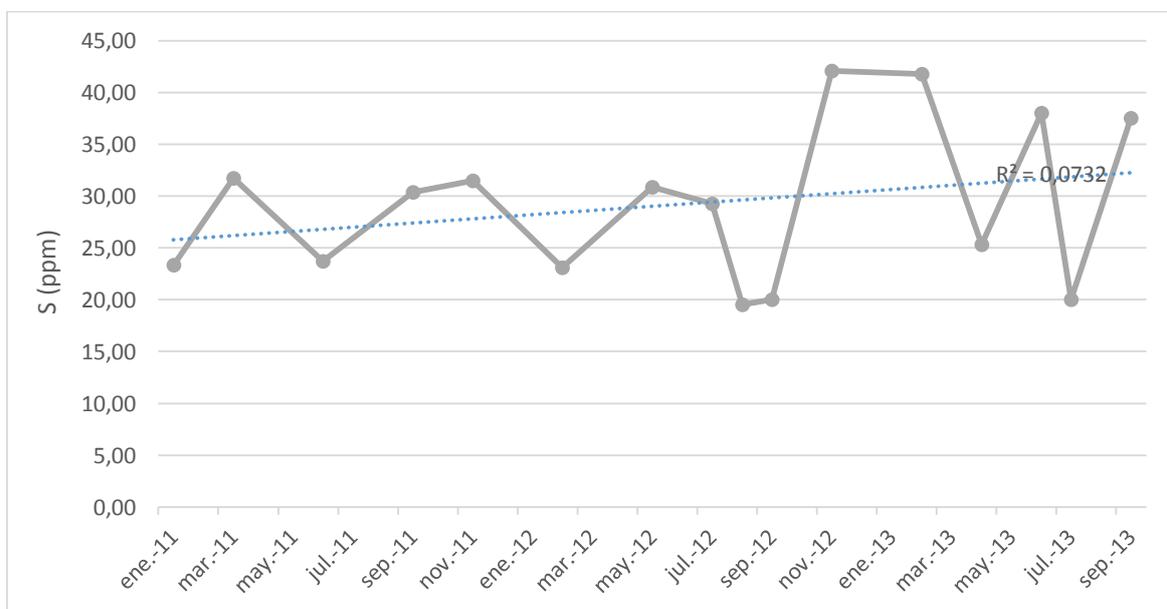
En la Figura 37, se grafican los resultados del comportamiento temporal que ha tenido la evolución de la calidad del combustible diésel, en relación a su contenido de azufre, para el periodo 2005 a 2010. Se observa su tendencia a la disminución, ya sea por la introducción de nueva normativa respecto a este aspecto, y por consiguiente una distribución de diésel de mejor calidad. El coeficiente de correlación resultante es de un valor de  $R^2=0.6737$ , que indica la disminución del azufre en los combustibles diésel, mientras que cuando se consideran los valores de los 3 últimos años, se obtiene un  $R^2=0.8074$ . Solo se consideraron los meses que contaban con registros de resultados.



**Figura 37: Contenido de azufre en los combustibles diésel distribuidos en Lima y Callao (ppm), 2005 – 2010**

FUENTE: Elaboración propia, con los datos de OSINERGMIN.

Para un mejor análisis del último periodo, 2011 a 2013, se realiza la figura 38:



**Figura 38: Contenido de azufre en el diésel b5 (2011 - 2013)**

FUENTE: Elaboración propia, con los datos de OSINERGMIN.

De esta última figura se observa que el contenido de azufre no supera los 50 ppm para diésel b5, y existe un muy pequeño incremento respecto al tiempo, pero que no resulta muy significativa.

Para analizar el contenido de azufre en los combustibles (ppm) se ha promediado los registros, de los puntos de distribución que están involucradas en la comercialización de diésel en la ciudad de Lima. Además, los combustibles diésel registrados, en el periodo de estudio, son los siguientes: Diésel 2, Diésel b2 y Diésel b5; cuyo periodo de distribución se contempló así:

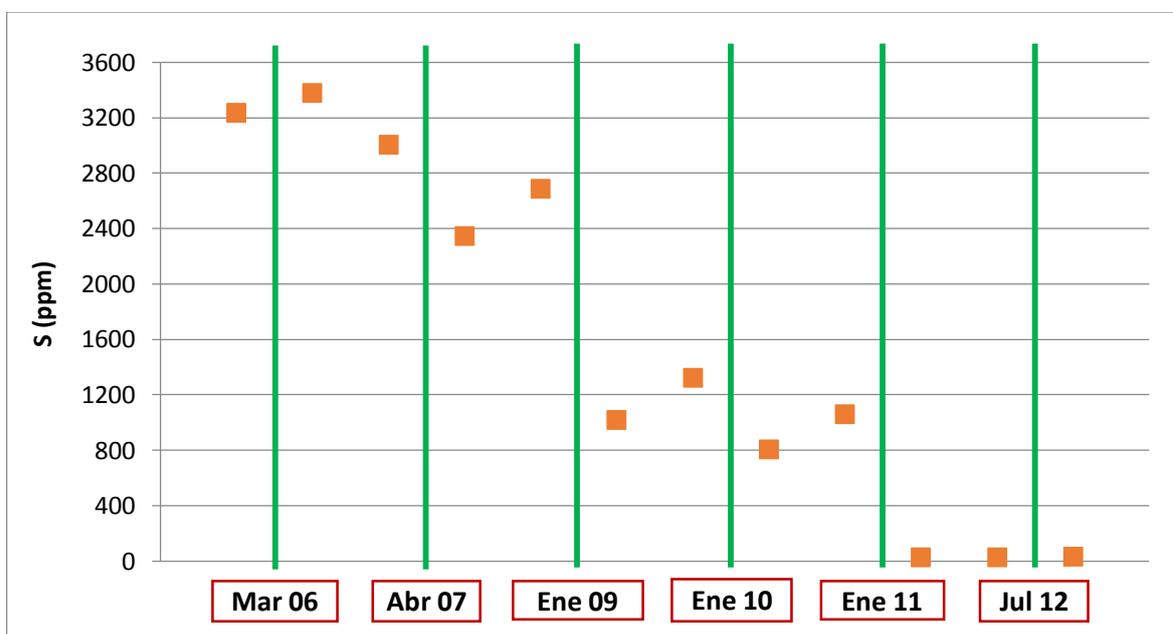
- Diésel 2: periodo 2005 al 2008.
- Diésel b2: periodo 2009 al 2010.
- Diésel b5: periodo 2011 al 2013.

Estos periodos de venta fueron estimados de los datos registrados en el monitoreo del contenido de azufre en los combustibles diésel y de la demanda, en los meses en que se pudieron registrar estos valores en determinados combustibles diésel que se estaban distribuyendo en esos momentos.

Se observa que el diésel 2 fue el único combustible que estuvo siendo distribuido desde el año 2005 hasta 2008. Según los análisis realizados, este combustible presenta altos contenidos de azufre, oscilando sus valores, en el periodo en estudio, desde 230 ppm hasta 3400 ppm, sin embargo, predominan valores altos, en órdenes de 1500, 2000 y 3000 ppm. Con el diésel b2 se tuvo un periodo de distribución de también 2 años, en los años 2009 y 2010, con valores promedio que alcanzarían entre unos 800 a 1000 ppm diferenciándose una época de transición. Finalmente el diésel b5 fue distribuido en el último periodo correspondiente al estudio, entre los años 2011 al 2013, pero a diferencia del anterior, este fue un combustible con mejores estándares respecto al contenido de azufre, ya que sus valores fueron bajos, variando entre un máximo de 41.75 ppm y un mínimo de 20 ppm.

De los datos obtenidos se concluye que los combustibles con menor contenido de azufre en su composición corresponden al Db5; mientras los que tienen mayor contenido de azufre son D2 y regular el Db2.

Conjuntamente con la evaluación de la evolución del contenido de azufre en los combustibles diésel, las normativas promulgadas están estrechamente relacionadas a esta variable, ya que son las que regulan directamente la calidad de dichos combustibles en cuanto al parámetro en estudio. Como se graficó en la Figura 4, se tiene una serie de normativas promulgadas a lo largo del tiempo, que no solo se relacionan directamente a los límites del contenido de azufre, sino también las que mencionan diversos periodos donde se promueve o limita la comercialización de determinados combustibles, o los relacionados a los biocombustibles y su composición; todas ellas publicadas en determinadas fechas a lo largo de la regulación de esta variable para la mejora en la calidad de los combustibles y, por ende, en la calidad del aire, abarcando desde el año 2001 hasta el 2012 por diferentes organismos estatales. Las ideas principales de estas normativas pueden apreciarse en el Anexo 5 del presente documento.



**Figura 39: Comparación entre contenido de azufre y normativas promulgadas.**

FUENTE: Elaboración propia, con los datos de OSINERGMIN.

Como se observa en la figura 39, las variaciones de las variables para el contenido promedio de azufre entre cada periodo, tomando como referencia la fecha de promulgación de las normativas relacionadas a la calidad del combustible en cuanto a dicha variable, se han reducido conforme el tiempo según se mencionó en párrafos anteriores, y verificando entre cada fecha de promulgación han ocurrido disminuciones y también ligeros incrementos, pero

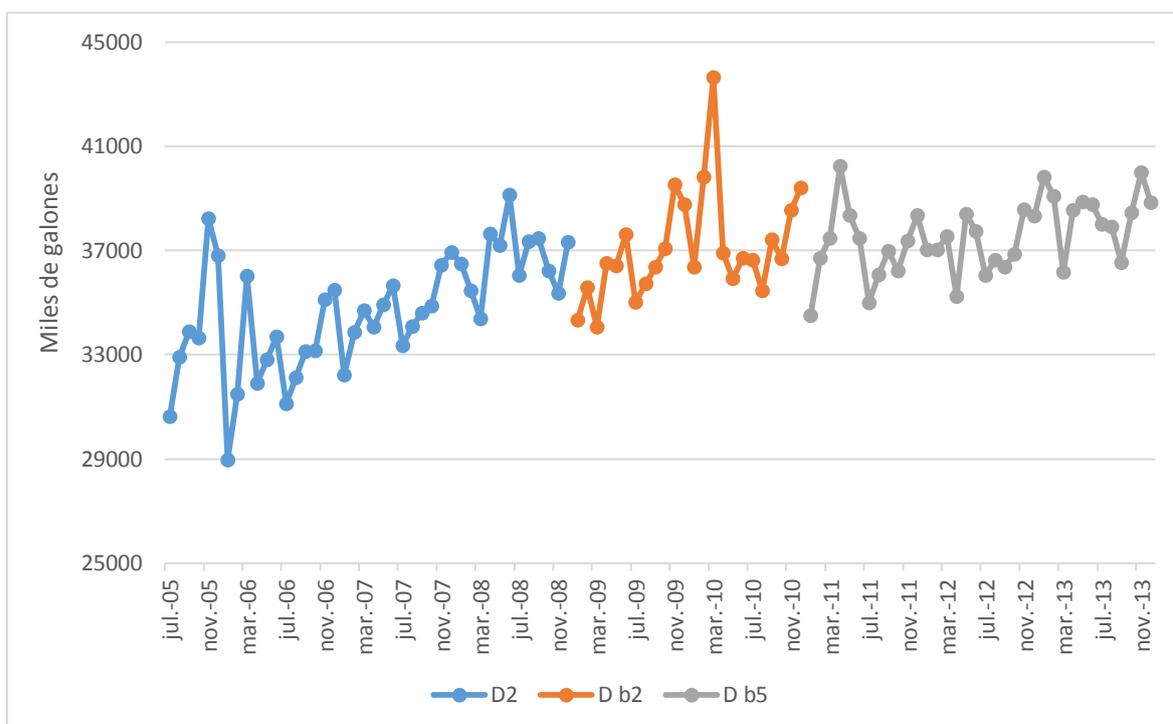
llegando a concentraciones finales que bordean los 50 ppm, evidenciando una buena implementación técnica junto a la legislación acorde a la calidad de los combustibles distribuidos en Lima.

Del análisis respectivo, se evidencia que el comportamiento del contenido de azufre ha venido evolucionando con el pasar del tiempo, con altos contenidos de azufre en un principio sin estándares aplicables. Después con una época de transición, donde se comercializó diésel B2, en un esfuerzo por reducir dicho compuesto por las legislaciones ya establecidas, para finalmente permanecer en valores bajos por la normativa implementada, hasta valores máximos de 50 ppm. Sin embargo se hace necesario la fiscalización respecto a esta característica en las plantas de abastecimiento y centros de distribución que expandan directamente a consumidores finales, y verificar el cumplimiento de la calidad de sus combustibles.

Así mismo, de las expresiones obtenidas, con un coeficiente de correlación altamente significativo, se obtiene que la proyección del contenido de azufre seguirá en disminución, o se mantendrá en niveles bajos (salvo nuevas leyes de mejora a la calidad de los combustibles), dentro de los estándares establecidos, y que no representará un problema a futuro, pero que seguirá demandando controles y fiscalizaciones para el cumplimiento de su calidad, repercutiendo en el cuidado del medio ambiente y salud de las personas y también del parque automotor.

#### **4.2.2. Demanda de los combustibles diésel**

Respecto a la demanda de los combustibles diésel utilizados en la ciudad de Lima Metropolitana y Callao, los resultados son expuestos en la Figura 40, donde se observa el consumo de dicho insumo para el periodo del cual se contó con registros, del 2005 al 2013, diferenciando los combustibles diésel comercializados: diésel 2, diésel B2 y diésel B5.

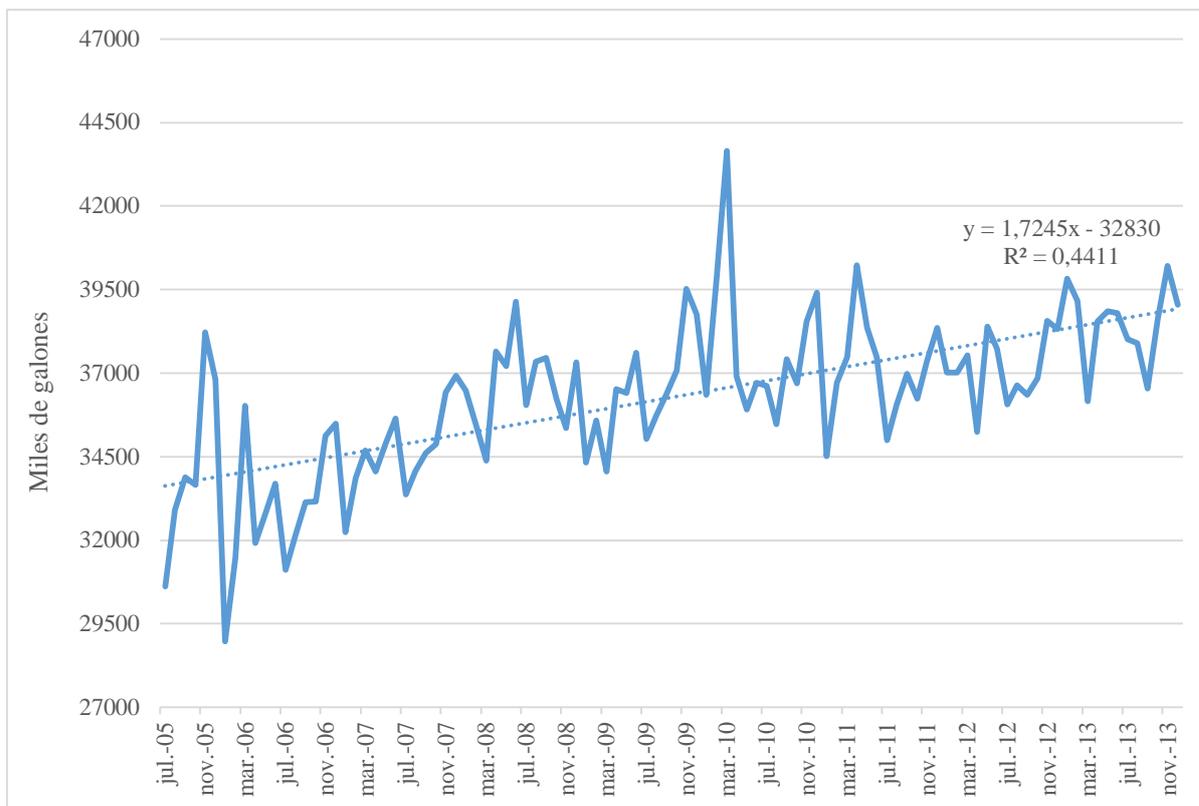


**Figura 40: Demanda de los combustibles diésel según su tipo, en la ciudad de Lima.**

FUENTE: Elaboración propia, con los datos del OSINERGMIN.

Como se puede apreciar, el consumo de los combustibles diésel D2 ha venido siendo registrado desde el año 2005, a pesar de que su comercialización se realizara desde tiempo atrás. Las legislaciones implementadas han permitido el ingreso de combustibles más “limpios”, como el diésel B2 entre los años 2009 y 2010. Con el aumento en el consumo de éstos últimos también ha llegado la reducción del consumo de los diésel con un alto azufre, pero que sin embargo aún se mantenía comercializando en menores cantidades. Ya en los años 2011, 2012 y 2013, los combustibles diésel B5 eran los que mayor porcentaje obtenían en la comercialización en Lima, siendo despreciable los de alto azufre.

Mientras que en la figura 41, se puede observar el consumo total en Lima Metropolitana y Callao, tanto de combustibles diésel con alto y bajo contenido de azufre.



**Figura 41: Demanda de los combustibles diésel en la ciudad de Lima, periodo 2005 – 2013**

FUENTE: Elaboración propia, con los datos del OSINERGMIN..

Como se aprecia, los resultados obtenidos comprenden el periodo a partir de Julio 2005 hasta diciembre 2013. Para los años anteriores no se tiene registro del consumo de este insumo, iniciándose a mediados del 2005 el control y registro de los combustibles diésel, medidos en galones por día, por lo que mediante un cálculo de conversiones se obtuvieron los consumos por mes y en miles de galones, que fue la unidad en la que se registraron dichos datos.

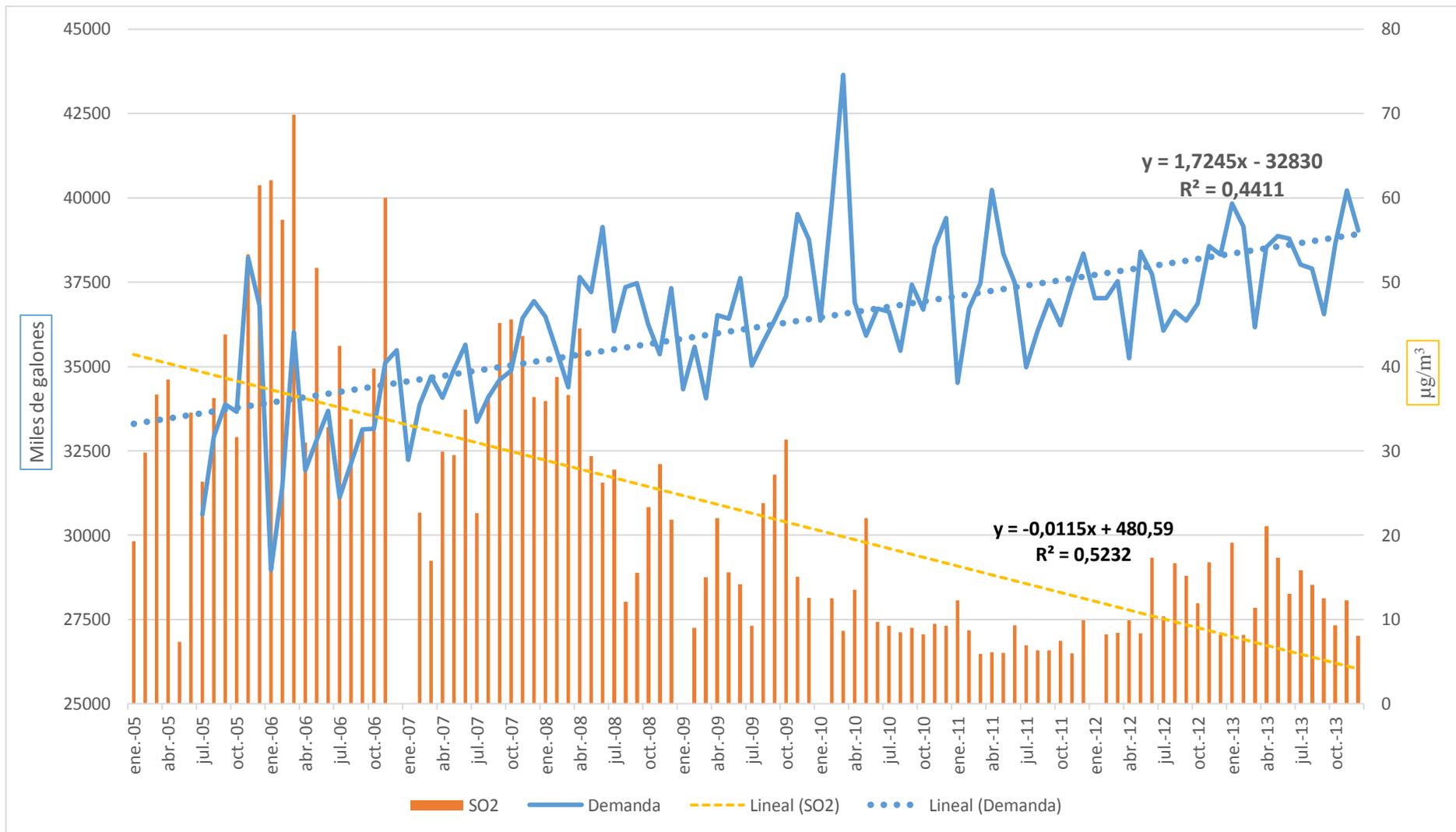
En el gráfico se observa un comportamiento irregular, con incrementos y decrecimientos constantes con una tendencia al aumento. Es razonable que con el transcurrir del tiempo se haya incrementado el consumo del combustible diésel, por la mayor adquisición de automóviles, mejora en los ingresos y el aumento de la población, que genera un mayor desplazamiento en la capital. Se tiene un coeficiente de correlación  $R^2=0.4411$ , lo que indica una relación directa entre el tiempo y la demanda de combustibles diésel, obedeciendo que con el transcurrir del tiempo se incrementa el consumo del insumo descrito, a pesar que dicho valor no sea muy significativo, sirve para confirmar la tendencia de aumento.

Del análisis realizado, se aprecia que el comportamiento de la demanda de los combustibles diésel ha ido en tendencia positiva (actividad económica, mayor número de vehículos, uso industrial, etc.) donde se evidencia una mala calidad del diésel que se distribuía desde años atrás, con datos desde el año 2005, y que después de una etapa de consumo de diésel B2, se inició con el consumo de diésel B5, con bajo azufre, manteniendo la tendencia al aumento conforme pasaba el tiempo. Debido a esto, la proyección de la expresión obtenida, arroja un aumento en el consumo en el mercado de los diésel con bajo contenido de azufre y seguirá en crecimiento. Su impacto en cuanto a la calidad del aire se ve reflejado en una relación inversa, a manera general, indicando que a un mayor consumo de diésel las concentraciones de dióxido de azufre disminuyen; sin embargo esto responde por las legislaciones aplicadas en el periodo de estudio y hasta la transición para un uso de mejor calidad de combustibles. Una vez que las concentraciones estén en un valor tope bajo, esta demanda podría influenciar a que alcancen valores más altos, por lo que ya se debería regular su consumo, apuntando a su reducción.

### **4.3. INFLUENCIA DEL CONTENIDO DE AZUFRE Y DEMANDA DE LOS COMBUSTIBLES DIÉSEL EN LAS CONCENTRACIONES DE DIÓXIDO DE AZUFRE**

#### **4.3.1. Dióxido de azufre y demanda vs tiempo**

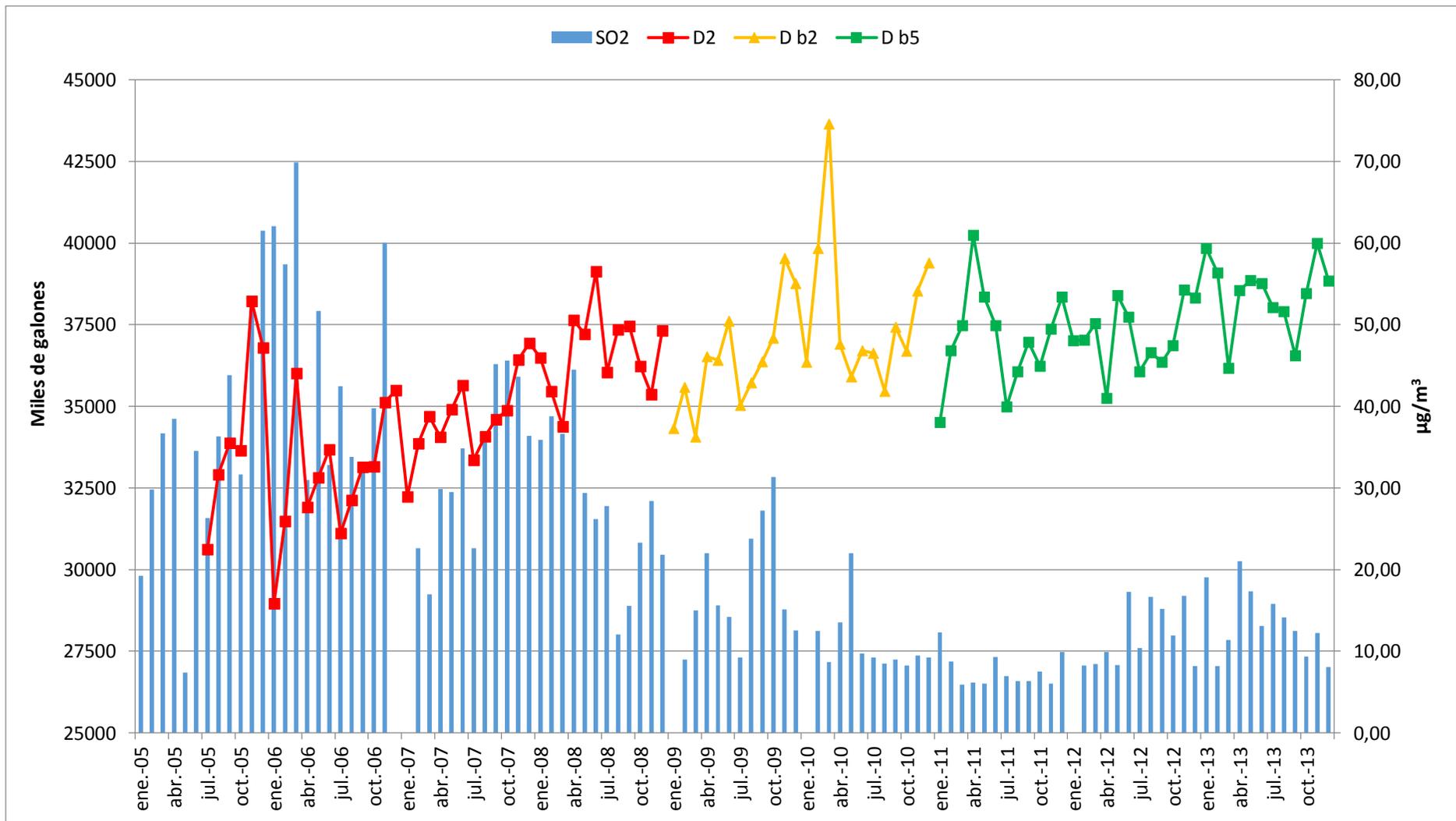
Realizando la asociación de los resultados obtenidos del análisis de datos, respecto a los datos de la demanda de los combustibles diésel y las concentraciones de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) vs Tiempo, se tienen los resultados de la Figura 42.



**Figura 42: Concentración de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) vs Demanda (Miles de galones al mes)**

FUENTE: Elaboración propia, con los datos del DIGESA y OSINERGMIN.

Se aprecia que a pesar que la demanda de combustibles ha ido en aumento, como se espera en una ciudad en constante crecimiento, las concentraciones de dióxido de azufre se han ido reduciendo, presentando un factor de correlación de  $R^2=0.4411$  y  $R^2=0.5232$ , respectivamente (tomando los registros desde julio 2005, mes donde se inició el registro de la demanda de combustibles), lo que evidencia que uno de los factores que contribuyen a este comportamiento es la mejora en la calidad de los combustibles utilizados, específicamente del diésel y su contenido de azufre. Sin embargo, verificando el último periodo, se observa un ligero aumento de las concentraciones de dióxido de azufre para el periodo 2011, 2012 y 2013. Respecto a este último punto, la figura 43 plantea el posible comportamiento de ese último periodo, donde diferencia la demanda de los distintos tipos de combustibles diésel.



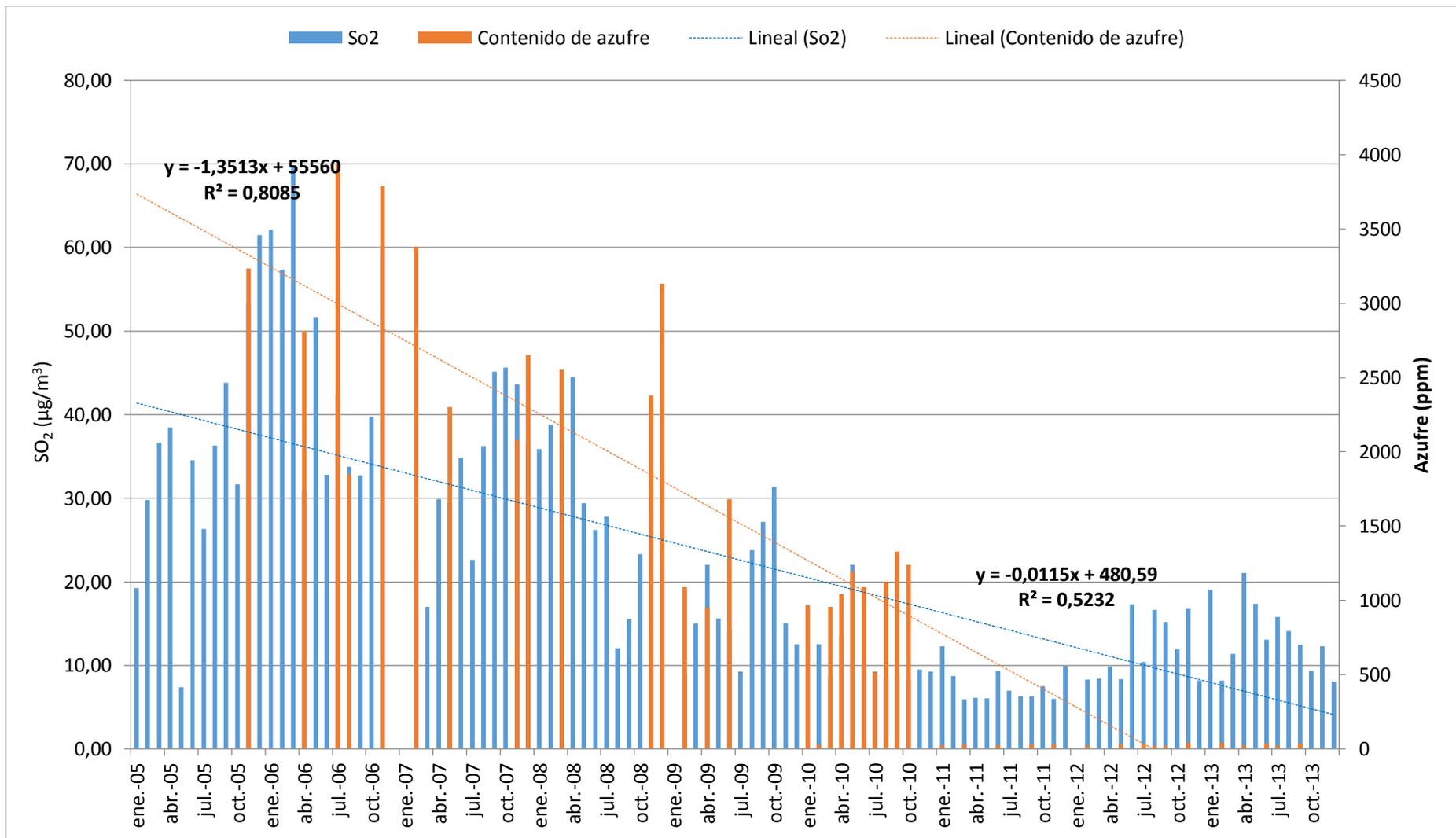
**Figura 43: Concentración de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) vs Demanda-Tipos de combustible diésel (Miles de galones al mes)**

FUENTE: Elaboración propia, con los datos del DIGESA y OSINERGMIN.

Por lo que se observa de la figura anterior, las concentraciones han ido en aumento, afectado directamente por el consumo de los combustibles diésel con un alto contenido de azufre, y como se observó en la figura 36, pese que aún se distribuía este diésel de mala calidad, el contenido de azufre fue reduciéndose poco a poco, posiblemente acorde a las legislaciones implementadas, aproximadamente hasta fines del año 2008. Para el 2009 se introdujeron combustibles diésel de una mejor calidad y con un menor contenido de azufre y que conformó un periodo de transición para la adecuación de un consumo final de éste diésel, que sin embargo se comercializaba en simultáneo con los diésel de alto contenido de azufre (aunque en menor demanda), el cual se había ido reduciendo poco a poco. Ya a principios del año 2010, se expende principalmente un diésel con bajo contenido de azufre (respecto al consumo de éste, los de alto azufre pueden ser despreciables ya que es una cantidad muy inferior) lo que se ve reflejado en la disminución de las concentraciones y cuyos valores se mantienen casi en los mismo niveles aproximadamente hasta finales del año 2011, punto en el cual estos valores empiezan a aumentar y mantienen un comportamiento irregular hasta el 2013.

#### **4.3.2. Dióxido de azufre y contenido de azufre vs tiempo**

Respecto al análisis de las otras variables, también se realizó la asociación de los datos registrados de la concentración de dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) y el contenido de azufre en los combustibles diésel (ppm) vs Tiempo, como se muestra en la Figura 44.



**Figura 44: Concentración de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y Contenido de azufre (ppm) vs Tiempo**

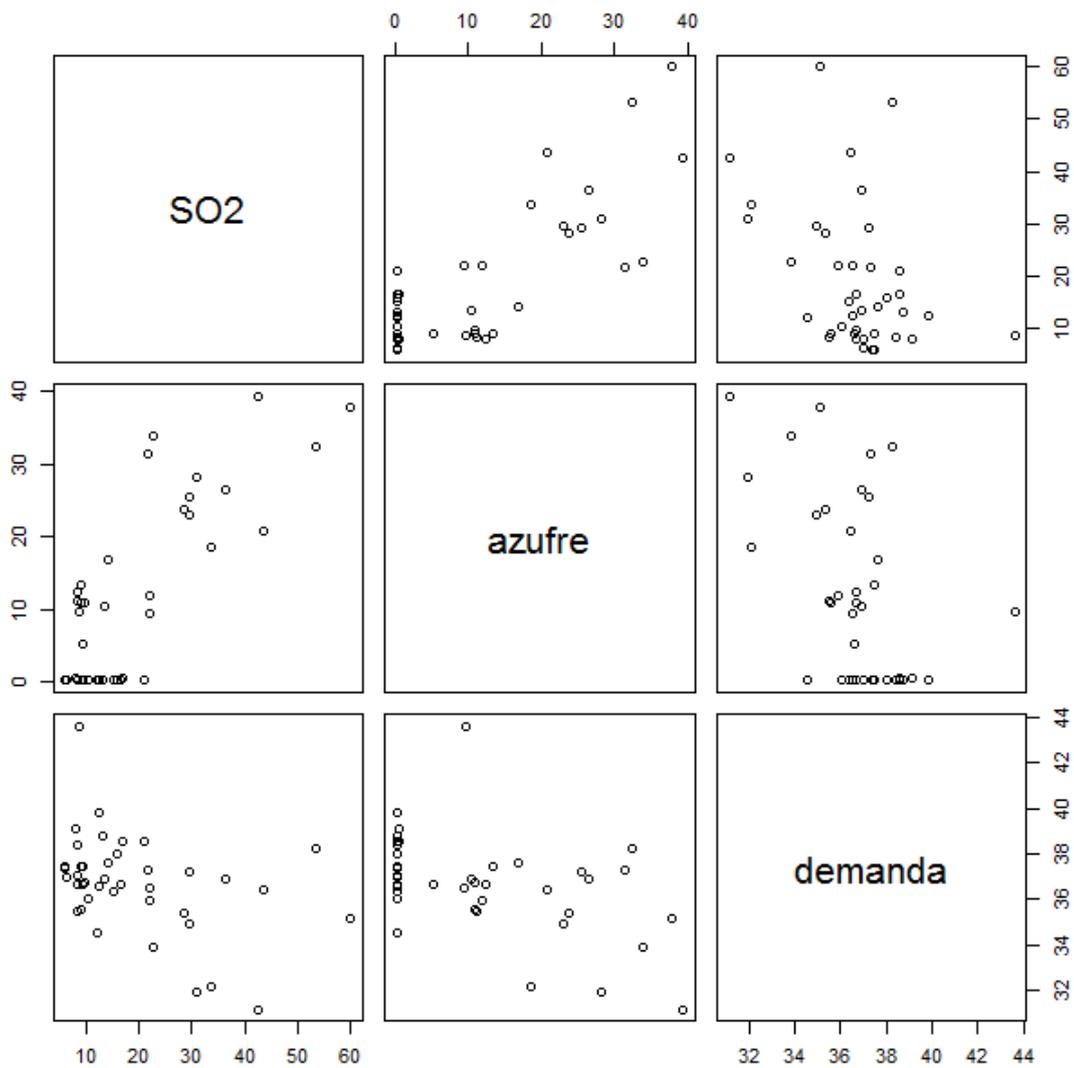
FUENTE: Elaboración propia, con los datos del DIGESA y OSINERGMIN.

Los resultados arrojan una relación directa entre las variables respecto al tiempo, obteniéndose un coeficiente de correlación  $R^2 = 0.8085$  y  $R^2 = 0.5232$ , para el contenido de azufre y concentración de dióxido de azufre, respectivamente, ambos con la tendencia a la disminución conforme transcurre el periodo de estudio.

Se evidencia el mismo comportamiento del dióxido de azufre ya que la variable es la misma, en los datos y el tiempo analizado, mientras que el contenido de azufre también presenta el mismo comportamiento, y que responde a las distintas normativas que se han ido promulgando y publicando en el transcurrir del periodo de análisis enfocándose a la reducción de este elemento en la composición de los combustibles diésel que se comercializan en Lima Metropolitana y Callao. Sin embargo, responde al mismo comportamiento de la concentración del dióxido de azufre respecto al periodo 2012 – 2013, cuyo ligero aumento se relaciona con el incremento de dicha variable, y que podría indicar que el contenido de azufre afecta los niveles de concentración de dióxido de azufre, como se expuso en la literatura, como una de las causas principales por la cual la presencia de dicha variable en el ambiente se podría encontrar en altos valores.

#### **4.3.3. Relación entre dióxido de azufre, contenido de azufre y demanda.**

Los resultados de las concentraciones de dióxido de azufre, contenido de azufre y demanda de combustible diésel fueron trabajados en el programa R, cuyos cálculos se pueden apreciar en el anexo 6. Los resultados gráficos se pueden observar en la figura 45.



**Figura 45: Correlación gráfica entre el dióxido de azufre, contenido de azufre y demanda de combustibles diésel (Valores mensuales)**

FUENTE: Elaboración propia.

A partir de dichos gráficos se puede apreciar una correlación significativa entre las variables de dióxido de azufre y el contenido de azufre, mientras que para las mismas variables en evaluación respecto a la demanda se aprecia un comportamiento disperso y no muy definido. Los pasos y procedimientos realizados en el software R pueden ser revisados en el Anexo 6. En cuanto al análisis estadístico los coeficientes obtenidos se presentan de la siguiente manera:

- Variable dependiente (y): Dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>)
- Variable independiente (x): Contenido de azufre
- Variable independiente (z): Demanda de combustible

Por lo que la ecuación generada atiende a la forma:

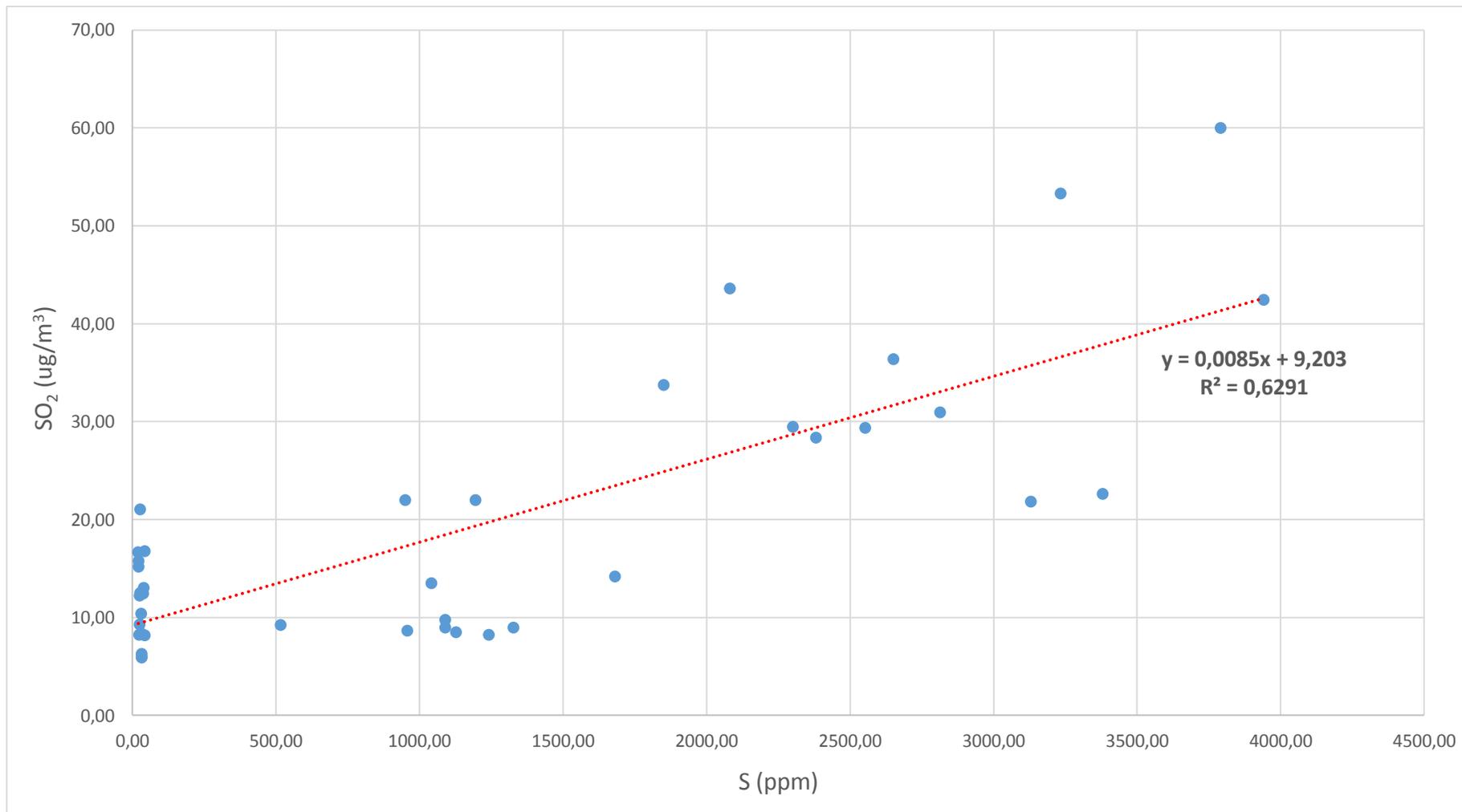
$$y = 14.479 + 0.71665x - 0.01828z$$

Con un coeficiente de correlación  $R^2 = 0.6327$ , que puede representar significancia representativa entre las variables. Analizando ambas variables independientes individualmente se obtiene que:

- Pvalor (azufre) = 0.0054
- Pvalor (demanda) = 0.55

Lo que indica una alta correlación del dióxido de azufre con la variable azufre pero una baja con la variable demanda.

Obteniendo tales resultados, se realiza la Figura 46, ejecutando un ploteo de los resultados promedios obtenidos para la concentración de dióxido de azufre SO<sub>2</sub> (µg/m<sup>3</sup>) y el contenido de azufre en los combustibles diésel (ppm), y su incorporación en un solo gráfico para una mejor apreciación del comportamiento y dependencia que se generen entre ellos. Esto responde a una relación directa entre ambas variables, obteniéndose un coeficiente de correlación  $R^2 = 0.6291$ , un valor significativo que indica que el aumento de los niveles de azufre en los combustibles repercute directamente a las concentraciones de SO<sub>2</sub> en la atmósfera.



**Figura 46: Correlación de Contenido de azufre (ppm) vs Concentraciones de dióxido de azufre (ug/m<sup>3</sup>)**

FUENTE: Elaboración propia.

Mientras que para el periodo 2011 a 2013, donde se detectan ligeros incrementos en la concentración, se obtienen los siguientes resultados:

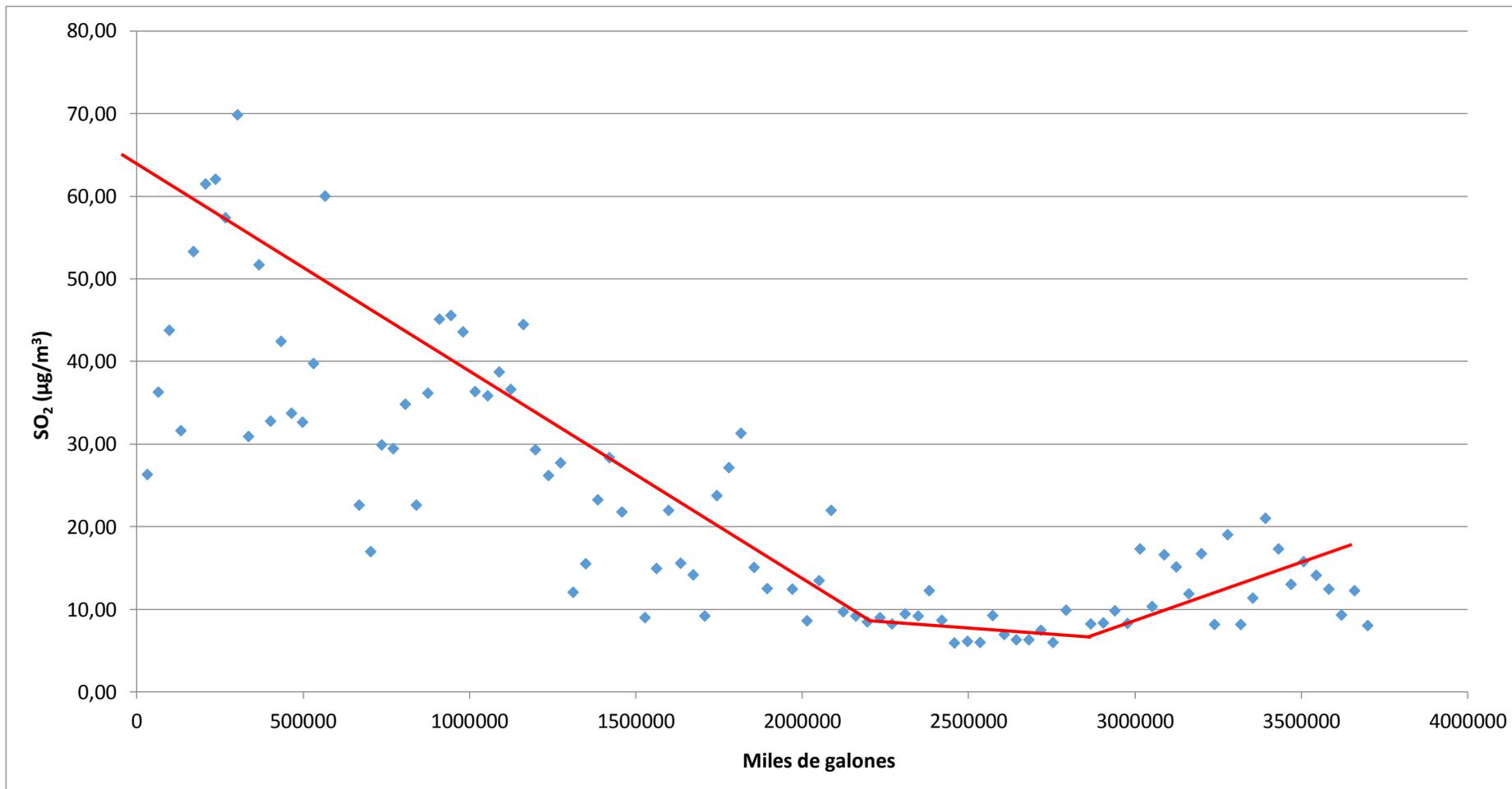
$$y = -6.0971 -25.89238x +0.08367z$$

Con un coeficiente de correlación  $R^2 = 0.5173$ , que puede ser significativa entre las variables. Analizando ambas variables independientes individualmente se obtiene que:

- Pvalor (azufre) = 0.04779
- Pvalor (demanda) = 0.00385

Lo que indica una correlación más significativa entre el dióxido de azufre con la demanda, lo que evidencia que para el periodo en que las concentraciones de dióxido de azufre lleguen a un tope mínimo, su incremento se verá influenciado en mayor proporción por el consumo de los diésel, además que seguirá manteniendo una relación con el contenido de azufre en dichos combustibles.

En un cuadro de doble entrada, como se observa en la figura 47, evaluando las concentraciones de dióxido de azufre y la demanda acumulada de combustibles diésel, considerando un periodo de alto contenido de azufre, transición y bajo contenido de azufre, se observa que el  $SO_2$  se ha ido reduciendo, debido a la legislación implementada, hasta un punto en donde los valores llegan a un mínimo y se mantienen estables, para luego tener un aumento y un comportamiento irregular en adelante. De ello se puede señalar que las concentraciones de dióxido de azufre llegaron a un punto mínimo, gracias a la reducción del contenido de azufre, y en adelante se verá afectado principalmente por la demanda de este diésel, ya que a pesar que los contenido de azufre sean bajos y se mantengan en esos valores, el aumento del consumo de estos combustibles con este azufre, emitirá mayores cantidades de  $SO_2$  en la atmósfera.



**Figura 47: Concentración de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) vs Demanda (Miles de galones al mes)**

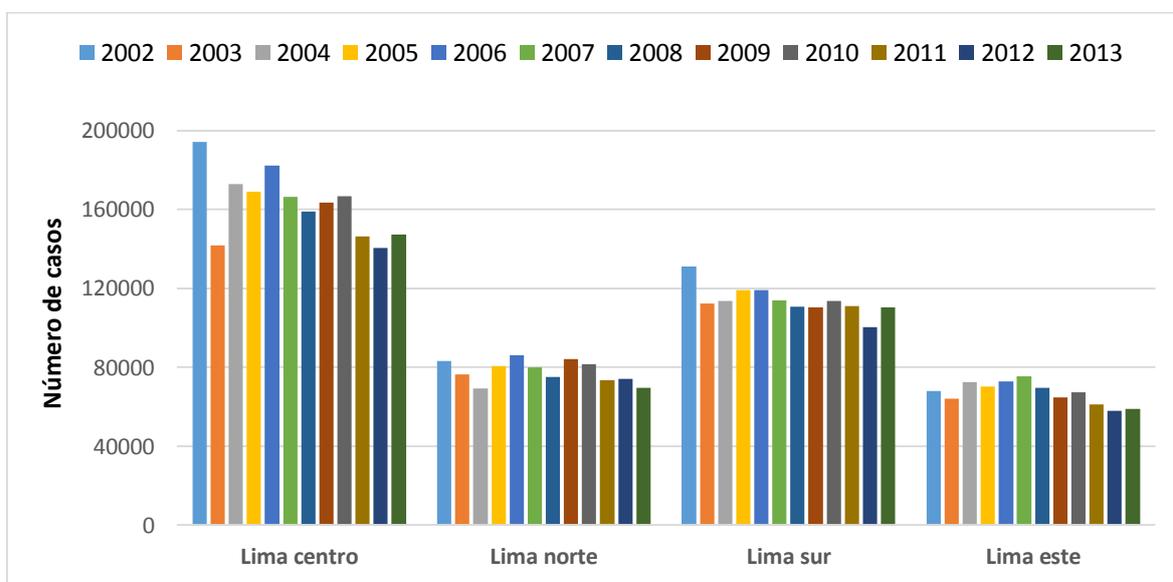
FUENTE: Elaboración propia.

Por lo tanto, de los resultados obtenidos, se concluye que la hipótesis planteada se acepta para el periodo de reducción de las concentraciones de SO<sub>2</sub>, y, así mismo, se rechaza para el periodo en que las concentraciones de SO<sub>2</sub> se van incrementando.

#### 4.4. EFECTO DEL DIÓXIDO DE AZUFRE, CONTENIDO DE AZUFRE Y DEMANDA DE LOS COMBUSTIBLES DIÉSEL EN LAS ENFERMEDADES RESPIRATORIAS

##### 4.4.1. Recolección de registros y análisis estadístico

Se realizó el análisis de los registros recolectados y proporcionados por el Ministerio de Salud (MINSA) los cuales contabilizan el número de casos ingresados según la categoría que corresponde a una determinada enfermedad respiratoria y población vulnerable, para el periodo 2002 al 2013. Como se mencionó anteriormente, se eligieron las enfermedades que tuvieron mayor relevancia respecto a la exposición al dióxido de azufre. Los datos fueron anuales y clasificados por distritos. En ese sentido, se escogieron los registros de los distritos donde se encontraba la estación de monitoreo y/o los más cercanos a ellos, ya que resultan más representativas, dada la proximidad.

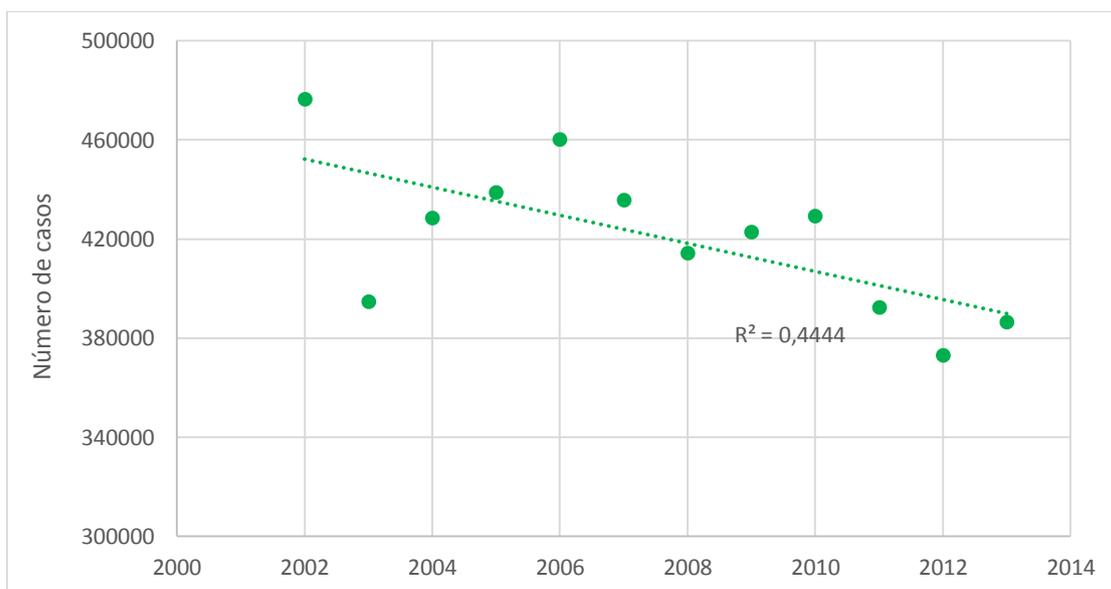


**Figura 48: Número de casos por enfermedades respiratorias relacionadas al SO<sub>2</sub>, en las zonas de Lima.**

FUENTE: Elaboración propia, con los datos del MINSA.

Como se observa en la figura 48, el mayor número de casos históricos de enfermedades respiratorias relacionadas al dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) se da en los distritos cercanos a Lima centro (Rímac, Lima, La Victoria) donde también se comprobó mayores niveles de concentración del dióxido de azufre, mientras que los menores niveles se dan en Lima este (El Agustino y Santa Anita). No se ha considerado Callao debido a la falta de registros.

Como síntesis, englobando el número de casos para Lima Metropolitana (exceptuando el análisis de la zona del Callao, ya que no se contaba con datos para todos los años lo que podría haber generado valores altos en algunos años y en otros no, resultando en la no representatividad del gráfico), se tiene la figura 49, que muestra una tendencia a la reducción para el periodo en estudio y con un coeficiente de correlación de  $R^2 = 0.4444$ .



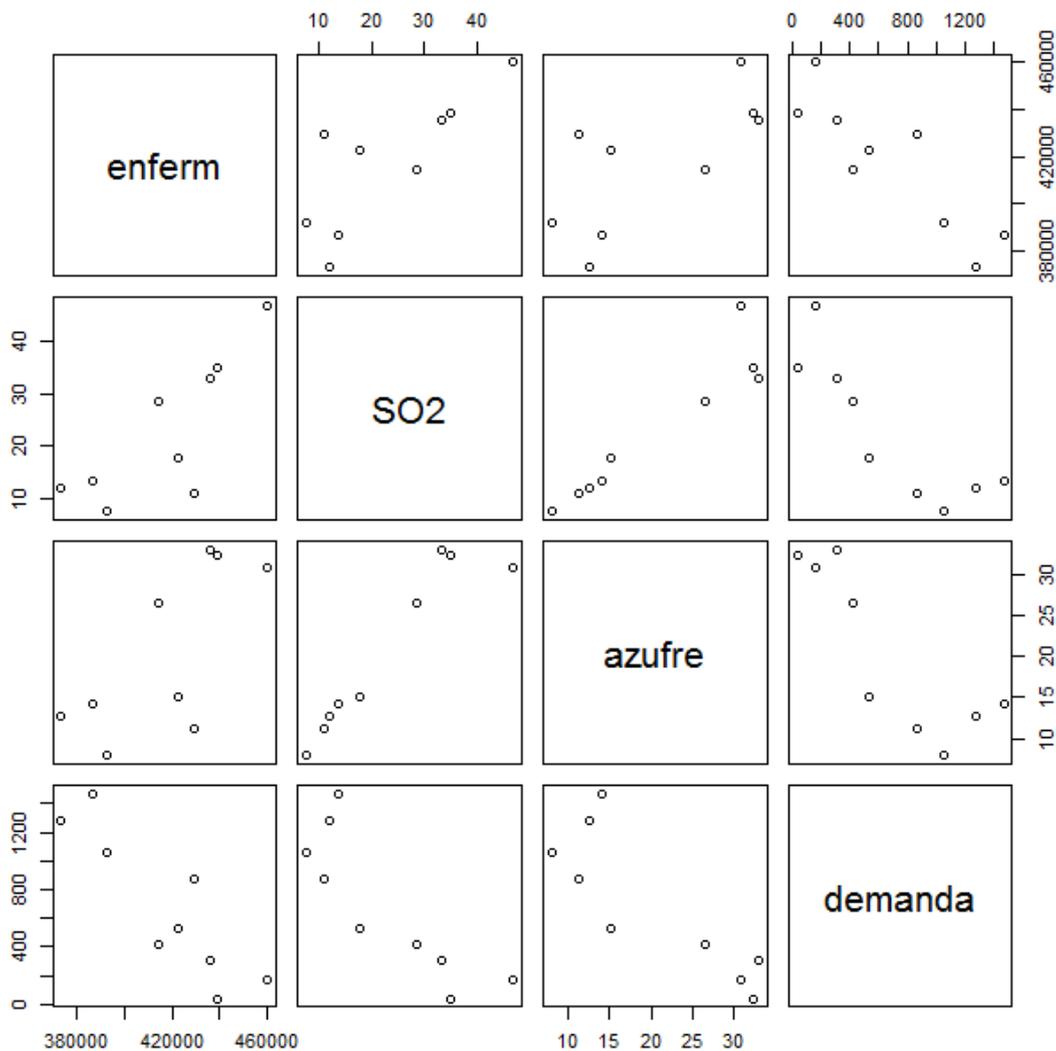
**Figura 49: Número de casos por enfermedades respiratorias relacionadas al SO<sub>2</sub>, Lima Metropolitana.**

FUENTE: Elaboración propia, con los datos del MINSA.

Si bien los coeficientes de correlación, para el caso de la variable “número de enfermedades respiratorias”, han resultado en valores bajos, sin embargo dan una respuesta a la reducción. Se debe tener en cuenta que los datos extraídos para el análisis de esta variable fueron calculados según proximidad a la estación de monitoreo y enfermedades más relacionadas a la exposición al dióxido de azufre, características obtenidas de la bibliografía, ya que no se

cuenta con un estudio específico ni un sistema que esté estrechamente relacionada al número de enfermedades respiratorias producto de la contaminación atmosférica.

La evaluación gráfica incorporando las 4 variables en la ecuación se observa en la figura 50, donde se observa que al ingresar la variable “enfermedades respiratorias”, mantienen una relación significativa a manera general con las demás variables.



**Figura 50: Correlación gráfica entre el dióxido de azufre, contenido de azufre, demanda de combustibles diésel y enfermedades (Valores anuales)**

FUENTE: Elaboración propia.

Sin embargo el análisis estadístico arroja los siguientes resultados:

Siendo:  $y$  = enfermedades respiratorias

x = dióxido de azufre

w = contenido de azufre

z = demanda de combustible

$$y = 51.54936 + 0.01791x + 0.14051w - 0.35049z$$

El coeficiente de correlación viene dado por  $R^2 = 0.6849$ , que indica la existencia de una correlación entre las variables. Sin embargo para las variables independientes se obtiene que:

- Pvalor ( $\text{SO}_2$ ) = 0.927
- Pvalor (azufre) = 0.59
- Pvalor (demanda) = 0.752

Lo que indica una baja relación de las variables independientes respecto a la dependiente, por lo que, a lo que respecta a las enfermedades respiratorias, la variable que más se relaciona y adecúa vendría a ser la concentración de dióxido de azufre. Para dicho cálculo se utilizaron solo 2 variables: “enfermedades respiratorias” (y) y “dióxido de azufre” (x), el cual resultó en los siguientes coeficientes:

$$y = 37.88956 + 0.16727x$$

Con un coeficiente  $R^2 = 0.6407$  y un Pvalor para el  $\text{SO}_2$  de 0.00956, que indica que la variable independiente “x” tiene una alta correlación con la dependiente “y”, el cual se explica, ya que si las concentraciones del  $\text{SO}_2$  aumentan, repercutirán negativamente a la salud de las personas y lo que llevará al ingreso de mayores casos por enfermedades respiratorias, aumentando su número.

Por lo tanto, se tiene que las concentraciones de dióxido de azufre se verán influenciados, en un primer periodo por el contenido de azufre en los diésel, y cuando los valores del contaminante se estabilicen a punto mínimo, la demanda de los combustibles tendrá una mayor influencia. Así mismo, las enfermedades respiratorias mantienen una más

significativa con las concentraciones de dióxido de azufre.

#### **4.4.2. Medidas de control y mitigación**

Respecto a los resultados y las proyecciones obtenidas, los siguientes planteamientos se dirigen hacia el control de emisiones, tanto de punto de vista operativo como de gestión, en donde se ha comprobado que éstas últimas han obtenido mejores resultados que las primeras, ya que se enfocan al sistema en general y no solo a puntos técnicos que muchas veces son vulnerados. Además se debe considerar que las medidas planteadas, tanto operativas como de gestión, deben ser complementarias e implementadas en un sistema integrado para un correcto manejo en cuanto a la mejora de la calidad del aire. Así, se recopilan ciertas medidas adoptadas internacionalmente y que han evidenciado mejores resultados, como lo exponen Ross & Associates Environmental Consulting (2007), Comisión Ambiental Metropolitana (2009), Huertas (2011) y Martínez (2014):

a. Reducción del contenido de azufre en los combustibles

De los resultados obtenidos se apreció que la calidad de los combustibles está estrechamente relacionada a las emisiones de dióxido de azufre en la atmósfera y que las anteriores medidas también formarían parte del presente acápite. Respecto a ello, una mejora en la calidad de los diésel repercutirá en una disminución de las concentraciones en el aire. Si bien ya se tiene valores bajos de azufre en estos combustibles, una mejor fiscalización y control, permitirá que no se comercialicen diésel que puedan tener alto azufre. Así mismo, introducir diésel con un menor contenido de azufre del que actualmente se tiene, podría ser una medida, no inmediata pero si a considerar, en cuanto se terminen los procesos de modernización de las refinerías y, así, poder alcanzar estándares de nivel internacional, como los combustibles de ultra bajo azufre. En éste último caso, se ha comprobado en la bibliografía que las experiencias internacionales respecto a la mejora en la calidad de los combustibles, específicamente en el contenido de azufre, ha contribuido directamente a la reducción de las emisiones de SO<sub>2</sub> a la atmósfera, y que ha resultado en la medida más utilizada en cuanto a la mejora de calidad de aire se refiera. También, una medida que se plantea en otros países, es la introducción de impuestos a determinados tipos de combustibles que sean considerados de mala calidad y así poder

disminuir su oferta y demanda. Esta medida operativa no sería implementada a corto plazo, teniendo en cuenta que aún está abarcando hacia otras regiones y que se tiene que tener un plan formulado en cuanto a impuestos o subsidios económicos se refiera, por lo que sería una medida a considerar a futuro.

b. Sistemas de control de emisiones

Los bajos niveles de emisiones provenientes de las unidades vehiculares, se relacionan al correcto mantenimiento y operación de los sistemas de combustible y encendido. Adicional a ello, se han diseñado diversos mecanismos para el control de las emisiones y disminuir la carga que se vierte a la atmósfera. Principalmente la instalación de filtros de partículas o catalizadores y convertidores catalíticos en los tubos de escape, que retengan las emisiones que se generen de la combustión de los combustibles diésel y que queden atrapadas en los dispositivos y por ende no aumenten las concentraciones del dióxido de azufre en la atmósfera. El mantenimiento y cambio de dichos dispositivos será primordial para el correcto control continuo de las emisiones del parque automotor. Sin embargo, para la adaptación de dichos mecanismos es necesario que las unidades cumplan ciertos parámetros, como modelo del motor, rendimiento del sistema y calidad del combustible que utilicen, por lo que en lugares donde aún se tengan unidades antiguas, la instalación de estos dispositivos será limitada; esta medida al ser operativa es una solución inmediata a las emisiones, pero que considera necesaria la instalación a cada unidad vehicular que circula en la ciudad, determinados requisitos para su instalación y posibles robos o mal funcionamiento después de un tiempo de vida útil. Por lo tanto su implementación sería una buena medida de control, ya demostrado en otras regiones, pero estaría limitado a ciertos tipos de vehículos.

c. Mantenimiento de unidades vehiculares

Un mantenimiento continuo de las unidades permitirá que no existan fugas o sobreconsumos en cuanto a los combustibles que utilicen. También el afinamiento y cambio de ciertas partes que incidan en una mejora en el rendimiento del vehículo, así como menores emisiones y eficiencia en el uso de combustible por parte de este. Así mismo, la introducción de nuevas regulaciones en cuanto a la eficiencia energética en las unidades vehiculares, tanto ligeras como pesadas, permitirá una reducción en el consumo de combustibles y repercutirá directamente en las emisiones gaseosas

producto de la combustión de ellos. Además aligerará la carga de la demanda por el mercado interno y reducirá las importaciones. La implementación de esta medida conlleva a la sensibilización de cada conductor, que al ser un factor humano, muchas veces no es tomada en cuenta por el ahorro de costos y tiempo; además supondría una eficiente y continua fiscalización en las vías para el respectivo cumplimiento de su mantenimiento periódico. Si bien se tiene un cronograma para el mantenimiento vehicular, se deberían tomar mayores esfuerzos para su cumplimiento e implementación de un mayor número de centros de revisiones vehiculares autorizadas y certificados que den abasto al parque automotor actual.

d. Renovación de unidades vehiculares

El retiro de unidades antiguas y obsoletas es una medida que se ha venido implementado pero que aún no ha conseguido afianzarse y obtener un parque automotor moderno y eficiente. La introducción y/o reemplazo de estas unidades vehiculares por otras más modernas, como los híbridos, eléctricos y los que funcionan a hidrógeno, sustituyendo la fuente energética, se vería más beneficiada con un tipo de subsidios, rebajas de impuestos u otras facilidades económicas, que permitan la promoción de dichos vehículos. Este reemplazo mitigaría las emisiones perjudiciales, producto de las unidades vehiculares obsoletas, y daría paso a una tecnología más limpia, sin emisión de gases contaminantes y la reducción en el consumo de ciertos combustibles. Sin embargo también podría verse restringida por la adaptación de estos vehículos a ciertas partes de la región, donde las condiciones del lugar podrían limitar su funcionamiento o por los costos un poco mayores para la adquisición de estas tecnologías. Esta medida podría complementarse con campañas macro y pagos de incentivos económicos con el chatarreo de las unidades retiradas, beneficiando también la recuperación y reciclaje de materiales. La adecuación de ésta medida es una de las más efectivas para el control del parque automotor, así como de las emisiones contaminantes que puedan generar.

e. Promoción y políticas de transporte público

Apuntando al menor uso de vehículos personales. Una mejor integración y modernidad del transporte público, así como una correcta oferta para la gran demanda en la capital y un mayor alcance en cuanto a distritos, llegando a un nivel masivo, permitirá que se

opte el uso de esta alternativa para el desplazamiento en la ciudad, aligerando la carga en las vías vehiculares, menos vehículos y menor uso de combustibles. No obstante, también se podría plantear algún bono o beneficio económico para el uso del transporte público. Se señalan alternativas como transportes con vías dedicadas, funcionamiento de metros y trenes, como actualmente ya se están implementando, con el metropolitano, la construcción del metro y los corredores azules, pero que sin embargo deberían llegar a mayores distritos, abarcar más rutas y priorizar avenidas donde la congestión vehicular es un problema constante, con sistemas viales ya colapsados. Esta medida es una buena alternativa para el ordenamiento vial, menor consumo de combustibles, mayor tecnología en cuanto a transporte público y por ende menores emisiones, experiencia ya implementada en varios puntos de la región de América Latina y que está en proceso de funcionamiento en la ciudad de Lima.

f. Programas de ordenamiento vehicular

Que establecen recorridos más cortos, planeamiento y optimización de las rutas, que aligeren el tráfico vehicular y por ende a un tiempo de viaje menor; todo ello apuntando a una menor circulación de vehículos, que permita el tránsito normal o periodos de congestión bajos, y así no se desperdicie el consumo del combustible en dicha unidad de transporte, tanto por esperar en el tráfico vehicular o por tomar rutas más largas hacia un determinado destino.

Retiro de unidades antiguas y obsoletas cuyos sistemas de funcionamiento consuman mayor cantidad de combustible, en menor tiempo y en menor recorrido, que las unidades más modernas, sin mencionar el hecho de una mayor generación de emisiones contaminante. Mientras que las restricciones viales permitirán una mayor eficiencia en el recorrido, limitaciones a ciertos tipos de transporte y en sus vías y horarios de circulación.

Al igual que en las medidas de control anteriormente planteadas, la reducción del número de vehículos circulando en la ciudad permitirá una reducción de las emisiones de dióxido de azufre. Estas políticas deberán ser reguladas y controladas a un nivel estatal y privado e implementar mediante, por ejemplo, un sistema de placas (ya utilizado en otras regiones), carriles especiales para autos con un número determinado de tripulantes (autos compartidos) y/o restricción de vehículos determinados días de la

semana, vías dedicadas al transporte público, autopistas, restricciones a la circulación de vehículos pesados.

No menos importante es la promoción de alternativas al transporte urbano sustentable, impulsando los sistemas no motorizados, como el uso de bicicletas o vías peatonales. Esta medida cuenta con ciertos factores de distancia a los centros de trabajo, universidades, etc. pero podría ser implementadas a nivel distrital y para determinados sectores, facilitando la implementación gradual y zonificada, como una buena alternativa al ordenamiento vial y una mejora al sistema integrado de transporte que actualmente se está implementando.

- g. Sistema de monitoreo de contaminantes atmosféricos y de vigilancia epidemiológica  
El constante y continuo monitoreo de las emisiones de dióxido de azufre permitirá llevar un control y registro del comportamiento de dicho gas, identificando periodos críticos y previniendo posibles escenarios de contaminación local. Además, con un registro periódico se podrán establecer zonas con mayor riesgo y concentrar los recursos necesarios para la prevención y evitar dichas situaciones.

Continuidad con el sistema de vigilancia epidemiológico para obtener el comportamiento del número de casos y realizar las actuaciones necesarias en caso existan evidencia de un incremento de las enfermedades respiratorias y las zonas en donde ocurrirían. Así mismo, mejorar dicho sistema, en cuanto a la evaluación y diferenciación de las enfermedades respiratorias causadas por la mala calidad del aire, permitirá una mejor evaluación y control respecto a que contaminantes o parámetros se debería tener mayor preocupación, en que zonas son más críticos los casos registrados, así como priorizar la población más vulnerable a estos efectos de la contaminación atmosférica.

Si bien es una medida primordial para el control de la contaminación atmosférica y sus efectos en la salud de las personas, es fundamental la mejora en cuanto esté punto para asegurar una mejor evaluación de la calidad del aire en tiempo real (mayores número de estaciones de monitoreo) y del sistema epidemiológico enfocado a las enfermedades respiratorias producidas por la mala calidad del aire, lo que incrementará significativamente las funciones y eficacia de un sistema de vigilancia y respuesta.

## V. CONCLUSIONES

- El comportamiento de las concentraciones de dióxido de azufre presenta una tendencia a la reducción en el periodo de estudio (enero 2005 a diciembre 2013), sin embargo, a partir de enero 2012 existe un incremento para esta última etapa, evidenciando el aumento de las concentraciones. Según ello, aún se mantiene una buena calidad de aire en Lima y Callao, pero, que según la tendencia, puede empeorar y superar los ECA establecidos, respecto al SO<sub>2</sub>, agravando la calidad del aire en el tiempo.
- El contenido de azufre en los combustibles diésel evidencia una tendencia a la reducción, donde las proyecciones indican que se mantendrá una buena calidad. Mientras que la demanda, responde a una tendencia positiva y su proyección responde al aumento progresivo del consumo de diésel B5 que, gradualmente, estará aportando mayores concentraciones de SO<sub>2</sub> a la atmósfera.
- El comportamiento de las concentraciones de dióxido de azufre presenta dos periodos, de reducción e incremento, donde en el primero tiene mayor influencia el contenido de azufre en los combustibles diésel y en el segundo, la demanda de éstos combustibles y en menor proporción el contenido de azufre, haciendo que progresivamente se emitan mayores cantidades de SO<sub>2</sub> a la atmósfera.
- Las enfermedades respiratorias han tendido a la reducción, haciéndose más evidente en los últimos 4 años del periodo de estudio. El número de casos mantiene una mayor correlación con el dióxido de azufre que con el contenido de azufre y demanda de los combustibles diésel, por lo que el control de las emisiones será necesaria, mediante implementación medidas de mitigación y control ya expuestas en el documento.

## **VI. RECOMENDACIONES**

- La autoridad competente debe gestionar por lo menos 2 equipos de monitoreo en cada estación, ya que por diferentes factores, se deja de recolectar los datos de monitoreo en el tiempo que dura dicha calibración y no registra la información por determinados periodos de tiempo. Además, ampliar la red de vigilancia de calidad de aire y asociar resultados de diferentes entidades para mayor cantidad de datos, siguiendo determinados protocolos para su implementación.
- Tener una fiscalización más eficiente y de una mayor frecuencia respecto a la venta de combustibles, en especial al contenido de azufre en los diésel. Así mismo, definir una metodología que abarque la mayor cantidad de plantas de ventas y/o refinerías en tiempos periódicos que comercialicen o distribuyan el combustible diésel en la ciudad de Lima y Callao, y que de esta forma permita recolectar una mayor y de mejor calidad dichos registros.
- Se recomienda realizar los análisis de datos incluyendo la variable del comportamiento del viento, dirección y velocidad, ya que este es un factor muy importante en la evaluación de la distribución de los contaminantes en determinadas áreas de estudio. En la presente tesis no se incluyó dicha variable, pero su incorporación al análisis daría resultados más precisos.
- Diferenciar los datos epidemiológicos, especialmente los relacionados a la contaminación atmosférica, que permitirán una mejor evaluación de la calidad del aire en la salud de las personas que viven en determinadas áreas geográficas y su impacto.
- Mejorar el acceso al sistema a la información pública de entidades estatales, ya que muchas veces es un limitante para el análisis de casos e investigaciones históricas.

- El presente trabajo es una primera aproximación a un estudio general en Lima, para que luego se pueda derivar a estudios más específicos en zonas más puntuales o determinadas.

## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Alfaro Medina, Arturo; Lombardi Valle, Gina. 2007. El azufre en los combustibles en el Perú. Programa Regional de Aire Limpio. Lima. 19 p.
2. Angulo, N. 2009. Tesis doctoral: Evaluación de la calidad del aire en la provincia de Las Palmas. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. Gran Canaria. 280 p.
3. ARAPER (Asociación de Representantes Automotrices del Perú). 2014. Propuestas LMPs vehiculares y calidad de combustibles. (En línea). Consultado el 2 de enero de 2016. Disponible en: <http://araper.pe/ckfinder/userfiles/files/Propuestas%20LMPs%20y%20Calidad%20de%20Combustibles.pdf>
4. ASTM (American Society for Testing and Materials). ASTM D4294: Standard Test Method for Sulfur in Petroleum and Petroleum Products by Energy-Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometry (En línea). Consultado el 12 de diciembre de 2015. Disponible en: <http://www.neft-standart.ru/images/standards/astm.d4294.1998.pdf>
5. BBVA Research. Unidad Perú. 2010. Perú Situación Automotriz (En línea). Consultado el 04 de febrero de 2015. Disponible en: [https://www.bbvaresearch.com/KETD/fbin/mult/peru\\_automotriz\\_2010\\_tcm346-274709.pdf](https://www.bbvaresearch.com/KETD/fbin/mult/peru_automotriz_2010_tcm346-274709.pdf)
6. Blumberg, Katherine O., Walsh, Michael P., Pera Charlotte. 2003. Gasolina y diésel de bajo azufre: la clave para disminuir las emisiones vehiculares. 78 p.

7. British Columbia. Health Link BC, CA. 2014. Calidad del aire exterior. Dióxido de azufre. 2 p.
8. Carbajal Romero, P. 2010. Evaluación de la contaminación del aire por dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) debido al uso de combustóleo en Tula, HGO. Tesis Mag. Sc. México D.F. instituto Politécnico Nacional. 102 p.
9. Catálogo de Normas Técnicas Peruanas. 2006. NTP ISO 10498/2006: AIRE AMBIENTAL. Determinación de dióxido de azufre. Método de fluorescencia ultravioleta. (En línea). Consultado el 10 de julio de 2016. Disponible en: <http://www.inacal.gob.pe/buscador/normas.php>
10. Clean Air Institute. 2013. La calidad del aire en América Latina: Una visión panorámica. Green, J., Sánchez, S. EUA, Washington D.C. 36 p.
11. Comisión Ambiental Metropolitana. 2010?. Programa para mejorar la calidad del aire de la Zona Metropolitana del Valle de México 2011-2020. México. 393 p.
12. Comité de Gestión: Iniciativa Aire Limpio, Lima – Callao, PE. 2010. II Plan Integral de Saneamiento Atmosférico para Lima – Callao. PISA 2011-2015. Lima. 76 p.
13. Córdova Leal, Ana M. 2007. Variabilidad de las concentraciones de SO<sub>2</sub> asociado a los sistemas sinópticos de Chile. Dirección de Investigación y Desarrollo. Universidad de Valparaíso. 36 p.
14. Cruz Núñez, Xóchitl. 2013. Oportunidades de mitigación de cambio climático: forzantes de vida corta en el transporte de la ciudad de México. Revista digital universitaria, vol. 14. UNAM. 12 p.
15. Defensoría del Pueblo. 2005?. La calidad del aire en Lima y su impacto en la salud y la vida de sus habitantes. (En línea). Consultado el 10 de octubre de 2016. Disponible

en: [sinia.minam.gob.pe/download/file/fid/39237](http://sinia.minam.gob.pe/download/file/fid/39237).

16. Dirección General de la Evaluación ambiental. Conserjería de Agricultura y Medio ambiente. Programa de reducción de dióxido de azufre en Puertollano. (En línea). Consultado el 20 de noviembre de 2016. Disponible en: [http://pagina.jccm.es/medioambiente/rvca/pdfs/programa\\_reduccion\\_so2\\_puertollano.pdf](http://pagina.jccm.es/medioambiente/rvca/pdfs/programa_reduccion_so2_puertollano.pdf)
17. DIGESA (Dirección General de Salud Ambiental). 2005. Protocolo de monitoreo de la calidad del aire y gestión de los datos. (En línea). Consultado el 10 de agosto de 2014. Disponible en: [http://www.digesa.sld.pe/norma\\_consulta/protocolo\\_calidad\\_de\\_aire.pdf](http://www.digesa.sld.pe/norma_consulta/protocolo_calidad_de_aire.pdf)
18. DIGESA (Dirección General de Salud Ambiental). 2006. Monitoreo de calidad del aire en la ciudad de Cerro de Pasco. Lima. 18 p.
19. Dirección General de Políticas, Normas e Instrumentos de Gestión Ambiental del Ministerio del Ambiente. 2010. Compendio de la legislación ambiental peruana – Volumen V – Calidad Ambiental. Decreto Supremo N° 003-2008-MINAM. Aprueban los estándares nacionales de calidad ambiental para aire. 374 p.
20. Dirección General de Salud Ambiental – DIGESA. 2006. Evaluación de la Calidad del Aire en la ciudad de La Oroya – Junín. (En línea). Consultado el 01 de julio de 2016. Disponible en: <http://digesa.sld.pe/depa/pral2/mpca-informes/OROYA%20MAYO%202007.pdf>
21. Fernández A. 2009. Como contaminan los gases de azufre. (En línea). Eroski Consumer. Consultado el 12 de diciembre de 2015. Disponible en: [http://www.consumer.es/web/es/medio\\_ambiente/urbano/2009/10/28/188844.php](http://www.consumer.es/web/es/medio_ambiente/urbano/2009/10/28/188844.php)

22. Gas Energy Latin America. 2016. Matriz de combustibles del Perú: Donde estamos y hacia dónde vamos. (En línea). Consultado el 25 de octubre del 2016. Disponible en: [http://www.agesp.com/agesp\\_eventos/pdf/a1.pdf](http://www.agesp.com/agesp_eventos/pdf/a1.pdf)
23. Huertas, J. 2011. Control de emisiones vehiculares. “Exigencias Tecnológicas para el Control y Monitoreo de Emisiones”. (En línea). Centro de Investigación en Mecánica Automotriz. Consultado el 01 de enero de 2017. Disponible en: <http://calidaddelaire.minam.gob.pe/docs/eve/78.pdf>
24. INEI (Instituto Nacional de Estadística e Informática). 2014. Una mirada a Lima Metropolitana. 81 p.
25. INEI (Instituto Nacional de Estadística e Informática). 2011. Perú: Anuario de Estadísticas Ambientales 2011. Centro de edición del INEI. Lima, Perú. 532 p.
26. Martínez, María. 2014. La importancia local y global del control de emisiones de vehículos. (En línea). Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Consultado el 31 de diciembre del 2016. Disponible en: <http://www.theicct.org/sites/default/files/%5B9%20July%5D%20Keynote%20-%20Dr.%20Amparo%20Martinez,%20INECC.pdf>
27. MINAM (Ministerio del Ambiente). 2013. Aclaración del MINAM sobre estándar de calidad ambiental del aire. (En línea). Consultado el 10 de mayo de 2016. Disponible en: <http://www.minam.gob.pe/notas-de-prensa/aclaracion-del-minam-sobre-estandar-de-calidad-ambiental-del-aire/>
28. MINAM (Ministerio del Ambiente). 2016. Preguntas y respuestas para entender el caso del Euro IV. (En línea). Consultado el 20 de diciembre del 2016. Disponible en: <http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2016/07/preguntas-y-respuestas-Euro-IV-15-07-2016Revisi%C3%B3n-Ministro-5pm-copia.pdf>

29. Ministerio de Energía y Minas. 2005. Decreto Supremo N° 05-2005-EM: Aprueban Cronograma de Reducción Progresiva del Contenido de Azufre en el Combustible Diésel N°s. 1 y 2. Lima. 5 p.
30. Molinero, Luis M. Análisis de series temporales. Enero 2004. Asociación de la Sociedad Española de Hipertensión. 8 p.
31. Nava, Magdalena; Bravo, José Luis; Gasca, Jorge Raúl. 2003. Los métodos multivariados para evaluar el efecto de la reducción de azufre en petrolíferos sobre los niveles de bióxido de azufre atmosférico. Revista Internacional de Contaminación Ambiental, vol. 19. Universidad Autónoma de México. 25-36 p.
32. Nieto Barajas, Luis E. 2006. Módulo 6: Análisis Multivariado. Extensión universitaria ITAM. 24 p.
33. Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental. 2015. Instrumentos Básicos para la Fiscalización Ambiental. (En línea). Consultado el 03 de Abril de 2016. Disponible en: [http://www.oefa.gob.pe/?wpfb\\_dl=13978](http://www.oefa.gob.pe/?wpfb_dl=13978)
34. Organización Mundial de la Salud. 2005. Guías de la calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre. Resumen de la evaluación de riesgos. 25 p.
35. Organización Panamericana de la Salud. 2003. Clasificación Estadística Internacional de Enfermedades y Problemas Relacionados con la Salud. Washington D.C. (En línea). Consultado el 15 de agosto de 2015. Disponible en: <http://iris.paho.org/xmlui/bitstream/handle/123456789/6282/Volume1.pdf?sequence=1>
36. Perea, José. Sin fecha. Curso de Posgrado en Herramientas Estadísticas Avanzadas: Análisis Multivariante para Investigación en Sistemas Agropecuarios. Análisis

Cluster. Universidad Nacional de La Pampa. 97 p.

37. Poma, K. 2004. Evaluación de la calidad de diésel 2 basado en sus propiedades cetánicas (en línea). Consultado el 15 de julio de 2016. Disponible en [http://cybertesis.uni.edu.pe/bitstream/uni/970/1/poma\\_fk.pdf](http://cybertesis.uni.edu.pe/bitstream/uni/970/1/poma_fk.pdf).
38. REPSOL. 2016. Evolución y tendencias en calidad de combustibles. Jornada Técnica AAP. (En línea). Consultado el 02 de enero de 2017. Disponible en: <http://aap.org.pe/descarga/ea2016/REPSOL-Miguel-Gutierrez.pdf>
39. Rodríguez, Nicolás. 2012. Análisis de la reducción del azufre en el combustible diésel en El Salvador, Guatemala, Honduras y Nicaragua. Naciones Unidas, CEPAL. 75 p.
40. Ross & Associates Environmental Consulting. 2007. Estrategia y recomendaciones para la reducción de emisiones de diésel en la frontera de México y Estados Unidos. (En línea). Consultado el 01 de enero de 2017. Disponible en: <http://www.unep.org/transport/pcf/PDF/dieselrecomm-Sp.pdf>
41. Tamayo, Jesús; Salvador, Julio; Vásquez, Arturo; y De la Cruz, Ricardo (Editores) (2015). La industria de los hidrocarburos líquidos en el Perú: 20 años de aporte al desarrollo del país. Osinergmin. Lima-Perú. Consultado 14 marzo 2016. Disponible: [http://www.osinergmin.gob.pe/seccion/centro\\_documental/Institucional/Estudios\\_Economicos/Libros/Libro-industria-hidrocarburos-liquidos-Peru.pdf](http://www.osinergmin.gob.pe/seccion/centro_documental/Institucional/Estudios_Economicos/Libros/Libro-industria-hidrocarburos-liquidos-Peru.pdf)
42. Walsh, Michael P. 2008. Tendencias globales en el control de la contaminación vehicular, situación al 2008. 28 p.
43. Walsh, Michael; Kolke Reinhard. 2003. Combustibles y tecnologías vehiculares más limpias. Deutsche Gesellschaft fur Technische Zusammenarbeit (GTZ). 34 p.
44. Venegas, E. 2010. Calidad del aire y sus efectos en la salud humana. CEGESTI. 5 p.

45. SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú). Evaluación de la contaminación atmosférica en la zona metropolitana de Lima-Callao, Mayo 2008. (En línea). Consultado el 24 de noviembre de 2015. Disponible en: [http://www.senamhi.gob.pe/pdf/bolHidro\\_ambiente.pdf](http://www.senamhi.gob.pe/pdf/bolHidro_ambiente.pdf)

## VIII. ANEXOS

**ANEXO 1: Concentraciones dióxido de azufre ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) en Lima Metropolitana y Callao**

<b>AÑO</b>	<b>Mes / Estación</b>	<b>Conaco</b>	<b>Callao</b>	<b>Hipólito Unanue</b>	<b>María Auxiliadora</b>	<b>Santa Luzmila</b>
2000	ene-00	138.7			7.98	
	feb-00	154.01				
	mar-00	162.8				
	abr-00		29.45	69.08		27.82
	may-00					
	jun-00	153.1				
	jul-00					
	ago-00		39.13	19.28		28.08
	sep-00	106.01		42.6	27.45	28.37
	oct-00	129.87	13.93	30.86	28.11	25.15
	nov-00	87.45	9.12	22.4	35.97	32.24
	dic-00	82.08	7.45	10.1	13.84	7.62
2001	ene-01	64.83	31.13	27.44	16.67	27.01
	feb-01	61.92	6.55	25.25		27.37
	mar-01	88.45	9.78	24.42	13.87	
	abr-01	67.3	8.84	34.55	17.25	37.66
	may-01	83	15.01	33.72	18.15	23.45
	jun-01	81.89	13.36	31.44	26.31	23.64
	jul-01	67.86	12.1	17.79	12.98	18.6
	ago-01	119.15	4.69	23.57	10	17.28
	sep-01		9.23	18.45	10.36	15.43
	oct-01	47.67	3.19	21.96	9.69	13.57
	nov-01	76.24	31.84	28.05	19.47	22.72
	dic-01			23.51	16.34	74.17
2002	ene-02		12.27	14.95	10.95	32.93
	feb-02					
	mar-02			11.04	6.64	17.6
	abr-02			37.27	9.05	
	may-02			37.33	7.11	
	jun-02					
	jul-02				9.37	11.44
	ago-02					
	sep-02			15.35	7.45	13.12
oct-02			11.02	7.77	14.59	

<< Continuación >>

	nov-02			32.65	15.21	
	dic-02			22.76	20.9	36.19
2003	ene-03	42.66	13.13	11.66	12.33	17.92
	feb-03	71.47	12.88	17	16.95	17.17
	mar-03	117.87	43.07	50.41	22.61	
	abr-03	121.2				
	may-03	119.61	24.92	71.65	24.51	
	jun-03	102.27	32.45	29.73	17.17	19.45
	jul-03	67.25				
	ago-03	74.3				
	sep-03	82.29				
	oct-03	278.77				
	nov-03	114.46				
	dic-03	128.87				
2004	ene-04	136.39				
	feb-04	113.52				
	mar-04	88.69				
	abr-04	74.39				
	may-04	79.14				
	jun-04	65.85				
	jul-04	69.76		30.59		46.13
	ago-04	61.46	12.84	28.67	9.67	
	sep-04	66.26	6.39	33.74	22.57	
	oct-04			35.72	21.07	
	nov-04		2.32	23.52	12.72	
	dic-04				13.29	
2005	ene-05		6.63	42.6	8.6	19.19
	feb-05	69.53	6.25	35.79	14.94	22.39
	mar-05	72.11		30.99	18.18	25.38
	abr-05	71.16			10.93	33.37
	may-05	12.68	4.4			5.06
	jun-05	54.19	37.51		11.93	
	jul-05	51.71	10.8		13.68	29.14
	ago-05	64.09		18.68		26.1
	sep-05	37.96			18.82	74.68
	oct-05	51.45		23.7	19.81	
	nov-05	53.3				
	dic-05	61.48				
2006	ene-06	62.07				
	feb-06	57.39				
	mar-06	69.86				
	abr-06	53.68	8.8	39.87		21.53
	may-06	63.93	12.44	39.28		91.14

<< Continuación >>

2006	jun-06	44.73		28	25.75	
	jul-06	66.8	32.56	18.05	14.41	80.44
	ago-06	51.47	15.48	19.05	19.25	63.65
	sep-06	52.33		13.09		
	oct-06	39.78				
	nov-06	60.02				
	dic-06					
2007	ene-07					
	feb-07	50.42	9.25	11.79	17.79	23.98
	mar-07	45.41	9.26	8.72	9.99	11.57
	abr-07	63.66	15.05	35.28	11.78	23.72
	may-07	63.95	10.18	29.67	18.40	25.37
	jun-07	72.57	9.99	24.63	22.80	44.34
	jul-07	70.55	8.28	12.07	9.80	12.39
	ago-07	105.82	10.12	15.47		13.47
	sep-07	117.35	38.34	12.45		12.42
	oct-07	93.17	9.46	11.23	61.32	52.83
	nov-07	81.39	8.40	13.73	42.43	72.17
	dic-07	62.72	8.18	10.96	41.22	58.90
2008	ene-08	52.54	9.38	13.98	93.83	9.69
	feb-08	52.36	8.63	18.14	106.11	8.63
	mar-08	57.85	9.07	24.44	75.75	16.09
	abr-08	47.89	7.97	19.50	70.75	76.33
	may-08	47.05	12.78	14.88	56.01	16.21
	jun-08	37.23	14.41	18.27	48.19	12.94
	jul-08	29.43	9.73		58.02	13.93
	ago-08	20.50	7.80		11.15	8.83
	sep-08	29.27	8.78	11.86	18.67	9.13
	oct-08	31.51	12.36	10.00	53.79	8.82
	nov-08	40.00	8.00	11.00	68.00	15.00
	dic-08	24.00	10.90	10.00	50.90	13.40
2009	ene-09					
	feb-09				9.00	
	mar-09	34.00	8.00	10.00	9.00	14.00
	abr-09	9.00	8.00	9.00	50.00	34.00
	may-09	27.00	8.00	9.00	25.00	9.00
	jun-09	24.00	8.00	9.00	22.00	8.00
	jul-09	11.00	9.00	9.00		8.00
	ago-09	20.00	9.00	12.00	60.00	18.00
	sep-09	16.00	8.00	13.00	91.00	8.00
	oct-09		7.67	9.58	11.78	96.31
	nov-09		0.54	9.28	38.56	12.01
	dic-09		8.10	8.83	23.75	9.53

<< Continuación >>

2010	ene-10					
	feb-10		7.00	23.00	10.00	10.00
	mar-10		8.00	8.00		10.00
	abr-10		8.00	11.00	24.00	11.00
	may-10		8.00		19.00	39.00
	jun-10		9.00	9.00	11.00	10.00
	jul-10		8.00	13.00	9.00	7.00
	ago-10		8.00	10.00	9.00	7.00
	sep-10		8.00	9.00	12.00	7.00
	oct-10		8.00	10.00	8.00	7.00
	nov-10		8.00	9.00	13.00	8.00
dic-10		8.00	9.00	9.00	11.00	
2011	ene-11		8.18	8.19	14.30	18.45
	feb-11		7.78	7.79		10.64
	mar-11		8.27	7.76		1.78
	abr-11		9.45	6.98		1.95
	may-11		8.90	7.15		2.08
	jun-11		8.93	7.33	11.66	
	jul-11			6.92	12.21	1.73
	ago-11			6.83	10.43	1.71
	sep-11			8.44	8.80	1.71
	oct-11		8.09	8.26	11.84	1.73
	nov-11		7.84	8.45		1.72
dic-11		9.98	8.59	11.18		
2012	ene-12					
	feb-12		7.91	8.62		
	mar-12		8.23	8.61		
	abr-12			8.57	11.20	
	may-12		7.93	8.30	8.76	
	jun-12		15.70	18.20	18.02	
	jul-12		8.71	14.45	14.52	3.91
	ago-12		16.52	15.33	18.13	
	sep-12		13.81	14.89	16.89	
	oct-12		14.61	11.30	14.51	7.26
	nov-12		8.72	39.20	14.04	5.19
dic-12		8.23	9.72	9.46	5.35	
2013	ene-13	7.82	8.50	52.19	7.80	
	feb-13	8.72	6.19		9.69	
	mar-13	12.95	13.43		7.84	
	abr-13	12.22	7.76	52.17	12.01	
	may-13	9.34	7.50	43.74	8.83	
	jun-13	7.50	7.65	9.69	8.14	32.37
	jul-13	7.77	6.19	23.40	8.17	33.53

<< Continuación >>

2013	ago-13	9.90	6.51	9.65	8.79	35.75
	sep-13	8.85	6.38	7.50	8.71	31.01
	oct-13	8.81	7.65	8.03	7.07	15.11
	nov-13	9.42	6.11	8.86	6.41	30.53
	dic-13	6.55	6.46	7.58	6.43	13.26

**ANEXO 2: Contenido de azufre en los combustibles diésel – Refinerías y plantas de abastecimiento**

Procedencia	Tipo de diésel	Fecha de inspección	ASTM D 4294 - Azufre (ppm)
Herco Combustibles S.A.	Diésel B5 S50	26/02/2013	80
Planta de abastecimiento Conchán	Diésel B5 S50	26/02/2013	23
	Diésel B5 S50	12/04/2013	23
	Diésel B5 S50	12/06/2013	36
	Diésel B5 S50	12/09/2013	42
Refinería Conchán	Diésel B5 S50	24/07/2013	20
Planta de abastecimiento La Pampilla	Diésel B5 S50	25/02/2013	34
	Diésel B5 S50	17/04/2013	20
	Diésel B5 S50	27/09/2013	45
Refinería La Pampilla	Diésel B5 S50	25/02/2013	30
	Diésel B5 S50	17/04/2013	33
	Diésel B5 S50	24/06/2013	36
	Diésel B5 S50	24/06/2013	42
	Diésel B5 S50	27/09/2013	31
Refinería Conchán	Diésel 2 S50	06/02/2012	27
Refinería La Pampilla	Diésel B5 S50	07/02/2012	20
	Diésel B5 S50	11/05/2012	21
	Diésel B5 S50	16/07/2012	27
	Diésel B5 S50	08/08/2012	25
	Diésel B5 S50	27/09/2012	20
	Diésel B5 S50	29/11/2012	26
Planta De Ventas Pampilla	Diésel B5 S50	08/08/2012	22
	Diésel B5 S50	29/11/2012	32
Terminal Callao	Diésel 2 S50	07/02/2012	17
	Diésel B5 S50	07/02/2012	26
	Diésel B5 S50	07/02/2012	17
	Diésel B5 S50	07/02/2012	38
	Diésel B5 S50	07/02/2012	39
	Diésel B5 S50	21/02/2012	17
	Diésel B5 S50	21/02/2012	17
	Diésel B5 S50	18/05/2012	45
Terminal Callao	Diésel B5 S50	18/05/2012	23
	Diésel 2 S50	18/05/2012	46
	Diésel 2 S50	18/05/2012	20
	Diésel B5 S50	16/07/2012	22
	Diésel B5 S50	16/07/2012	32
	Diésel 2 S50	27/08/2012	17
	Diésel B5 S50	27/08/2012	24
	Diésel B5 S50	27/08/2012	18

<< Continuación >>

Terminal Callao	Diésel 2 S50	28/09/2012	20
	Diésel B5 S50	28/09/2012	20
	Diésel B5 S50	23/11/2012	28
	Diésel B5 S50	23/11/2012	39
Planta De Ventas Herco	Diésel B5 S50	21/02/2012	17
	Diésel B5 S50	19/11/2012	20
Planta de ventas Conchán	Diésel B5 S50	06/02/2012	25
	Diésel B5 S50	06/02/2012	27
	Diésel B5 S50	21/02/2012	23
	Diésel B5 S50	16/05/2012	30
	Diésel 2 S50	16/05/2012	30
	Diésel B5 S50	17/07/2012	36
	Diésel B5 S50	16/08/2012	21
Plantas de ventas Conchán	Diésel 2 S50	17/08/2012	17
	Diésel 2 S50	27/09/2012	20
	Diésel B5 S50	27/09/2012	20
	Diésel 2 S50	08/11/2012	52
	Diésel B5 S50	08/11/2012	48
Terminal Callao	Diésel 2 S50	24/06/2011	20
	Diésel 2 S50	10/01/2011	20
	Diésel B5 S50	10/01/2011	24
	Diésel B5 S50	14/03/2011	26
	Diésel B5 S50	24/06/2011	22
	Diésel B5 S50	12/09/2011	33
	Diésel 2 S50	12/09/2011	35
	Diésel B5 S50	21/01/2011	25
	Diésel B5 S50	14/03/2011	70
	Diésel B5 S50	24/06/2011	32
	Diésel B5 S50	12/09/2011	44
Refinería La Pampilla	Diésel B5 S50	11/01/2011	31
	Diésel B5 S50	28/03/2011	17
	Diésel B5 S50	08/06/2011	28
	Diésel B5 S50	29/09/2011	53
	Diésel B5 S50	22/11/2011	27
Refinería Conchán	Diésel 2 S50	12/01/2011	22
	Diésel 2 S50	22/09/2011	17
Planta de Ventas Herco	Diésel B5 S50	23/06/2011	23
	Diésel B5 S50	09/03/2011	25
	Diésel B5 S50	08/09/2011	35
Planta de ventas Conchán	Diésel 2 S50	11/01/2011	20
	Diésel B5 S50	11/01/2011	24
	Diésel 2 S50	15/03/2011	29
	Diésel 2 S50	23/06/2011	25
	Diésel B5 S50	23/06/2011	20
	Diésel B5 S50	22/09/2011	24

<< Continuación >>

Planta de ventas Conchán	Diésel B5 S50	15/11/2011	37
	Diésel 2 S50	15/11/2011	31
Refinería La Pampilla	Diésel B2 S50	04/01/2010	20
	Diésel B2 S50	18/03/2010	38
	Diésel B2 S50	22/04/2010	20
	Diésel B2 S50	17/05/2010	33
	Diésel B2 S50	16/06/2010	20
	Diésel B2 S50	26/08/2010	33
	Diésel B2 S50	16/09/2010	22
	Diésel B2 S50	18/10/2010	26
	D B2	18/03/2010	4230
	D B2	22/04/2010	3490
	D B2	17/05/2010	3590
	D B2	16/06/2010	3900
	D B2	20/07/2010	2800
	Refinería La Pampilla	D B2	26/08/2010
D B2		16/09/2010	3260
D B2		18/10/2010	3250
Refinería Conchán	D 2	17/06/2010	2140
	D 2	16/08/2010	1520
	D 2	14/10/2010	2390
Planta de ventas Conchán	Diésel B2 S50	04/01/2010	20
	Diésel B2 S50	18/02/2010	29
	Diésel B2 S50	17/03/2010	31
	Diésel B2 S50	22/04/2010	40
	Diésel B2 S50	19/05/2010	33
	Diésel B2 S50	19/05/2010	25
	Diésel B2 S50	17/06/2010	40
	Diésel B2 S50	22/07/2010	35
Plantas de ventas Conchán	Diésel B2 S50	16/08/2010	49
	D 2	04/01/2010	1910
	D 2	22/04/2010	1320
	D 2	19/05/2010	2180
	D 2	17/06/2010	2370
	D 2	27/09/2010	1550
	D B2	04/01/2010	1910
	D B2	17/03/2010	1780
	D B2	22/04/2010	1390
	D B2	17/06/2010	2350
	D B2	22/07/2010	1100
	D B2	16/08/2010	1540
	D B2	27/09/2010	1980
	D B2	14/10/2010	2340
Planta de ventas Herco	Diésel B2 S50	04/01/2010	20

<< Continuación >>

Planta de ventas Herco	Diésel B2 S50	17/03/2010	26
	Diésel B2 S50	22/07/2010	50
	Diésel B2 S50	29/09/2010	34
	Diésel B2 S50	19/10/2010	20
	D B2	21/04/2010	4120
	D B2	19/05/2010	1990
	D B2	17/06/2010	4060
Terminal Callao	Diésel B2 S50	05/01/2010	34
	Diésel B2 S50	05/01/2010	24
	Diésel B2 S50	17/02/2010	36
	Diésel B2 S50	17/02/2010	20
	Diésel B2 S50	19/03/2010	67
	Diésel B2 S50	19/03/2010	22
	Diésel B2 S50	21/04/2010	45
	Diésel B2 S50	28/04/2010	20
	Diésel B2 S50	04/05/2010	42
	Diésel B2 S50	16/06/2010	62
	Diésel B2 S50	16/06/2010	20
	Diésel B2 S50	21/07/2010	64
	Diésel B2 S50	13/08/2010	20
	Diésel B2 S50	13/08/2010	38
	Diésel B2 S50	13/09/2010	22
	Diésel B2 S50	13/10/2010	20
	Diésel B2 S50	13/10/2010	36
	D B2	19/03/2010	2420
	D B2	21/04/2010	2110
	Terminal Callao	D B2	04/05/2010
D B2		04/05/2010	2090
D B2		16/06/2010	2070
D B2		21/07/2010	1940
D B2		13/08/2010	2010
D B2		13/09/2010	1990
D B2		13/10/2010	1990
D B2		05/02/2009	1410
Planta Herco	D B2	03/02/2009	980
	D 2	05/02/2009	374
La Pampilla	D B2	04/02/2009	428
	D B2	04/02/2009	5040
Plantas de ventas Conchán	D B2	02/02/2009	604
	D 2	02/02/2009	598
Terminal Callao	D 2	01/04/2009	230
	D B2	22/04/2009	1710
	D 2	04/06/2009	824

<< Continuación >>

Herco Combustibles S.A.	D B2	20/04/2009	1660
La Pampilla	D B2	26/06/2009	285
	D B2	26/06/2009	4790
Plantas de ventas Conchán	D B2	21/04/2009	1640
Planta Herco	D 2	03/04/2008	304
La Pampilla	D 2	29/05/2008	4800
Plantas de ventas Conchán	D 2	07/05/2008	304
Terminal Callao	D 2	18/11/2008	2380
Herco Combustibles S.A.	D 2	11/12/2008	2580
La Pampilla	D 2	12/12/2008	4960
Plantas de ventas Conchán	D 2	16/12/2008	1850
Herco Combustibles	D 2	30/05/2007	2300
La Pampilla	D 2	23/02/2007	3140
Plantas de ventas Conchán	D 2	22/02/2007	3620
Herco Combustibles	D 2	20/11/2007	2080
Terminal Callao	D 2	07/12/2007	200
La Pampilla	D 2	10/12/2007	4400
Plantas de ventas Conchán	D 2	04/12/2007	3350
Herco Combustibles	D 2	1er periodo 2006	3000
Terminal Callao	D 2	2006	1600
Plantas de ventas Conchán	D 2	2006	1700
La Pampilla	D 2	2006	4950
Terminal Callao	D 2	18/08/2006	1850
Herco Combustibles	D 2	23/11/2006	3790
Plantas de ventas Conchán	D 2	25/07/2006	3080
La Pampilla	D 2	26/07/2006	4800
Terminal Callao	D 2	10/11/2005	2200
Plantas de ventas Conchán	D 2	11/11/2005	3200
La Pampilla	D 2	09/11/2005	4300

**ANEXO 3: Demanda de los combustibles diésel en Lima Metropolitana y el Callao.**

Año	Mes	Consumo de tipos de diésel (galones/día)			Consumo mensual (miles de galones)
		Diésel 2			
2005	ene-05				
	feb-05				
	mar-05				
	abr-05				
	may-05				
	jun-05				
	jul-05	1020729			30621.87
	ago-05	1097056			32911.68
	sep-05	1129362			33880.86
	oct-05	1121910			33657.3
	nov-05	1274276			38228.28
	dic-05	1226790			36803.7
2006	ene-06	965721			28971.63
	feb-06	1049409			31482.27
	mar-06	1200586			36017.58
	abr-06	1064008			31920.24
	may-06	1093981			32819.43
	jun-06	1122929			33687.87
	jul-06	1037343			31120.29
	ago-06	1071095			32132.85
	sep-06	1104721			33141.63
	oct-06	1105147			33154.41
	nov-06	1170608			35118.24
	dic-06	1182975			35489.25
2007	ene-07	1074491			32234.73
	feb-07	1128740			33862.2
	mar-07	1156353			34690.59
	abr-07	1135530			34065.9
	may-07	1163696			34910.88
	jun-07	1188416			35652.48
	jul-07	1112132			33363.96
	ago-07	1136175			34085.25
	sep-07	1153420			34602.6
	oct-07	1162694			34880.82
	nov-07	1214382			36431.46
	dic-07	1231047			36931.41
2008	ene-08	1216122			36483.66
	feb-08	1182007			35460.21
	mar-08	1145996			34379.88

<< Continuación >>

2008	abr-08	1254947			37648.41
	may-08	1240341			37210.23
	jun-08	1304461			39133.83
	jul-08	1201715			36051.45
	ago-08	1244914			37347.42
	sep-08	1248823			37464.69
	oct-08	1207765			36232.95
	nov-08	1178815			35364.45
	dic-08	1244157			37324.71
	Diésel b2, incluye diésel 2				0
2009	ene-09	1144243			34327.29
		Diésel b2			0
	feb-09	1186205			35586.15
	mar-09	1135452			34063.56
	abr-09	1217503			36525.09
	may-09	1213861			36415.83
	jun-09	1253918			37617.54
	jul-09	1167539			35026.17
	ago-09	1190623			35718.69
	sep-09	1212302			36369.06
	oct-09	1236165			37084.95
	nov-09	1317502			39525.06
	dic-09	1292060			38761.8
		Diésel b2	Diésel 2	Diésel b2 s-50	0
2010	ene-10	375213	3581	833209	36360.09
	feb-10	412765	464	914507	39832.08
	mar-10	517444	1161	936130	43642.05
	abr-10	316101		913980	36902.43
	may-10	323748		873419	35915.01
	jun-10	343298		880368	36709.98
	jul-10	327475		893428	36627.09
	ago-10	316607		865557	35464.92
	sep-10	337793		909786	37427.37
	oct-10	337310		885723	36690.99
	nov-10	378154		906559	38541.39
	dic-10	357927		955448	39401.25
		Diésel b5	Diésel b5 s-50		0
2011	ene-11	310747	839719		34513.98
	feb-11	319373	904257		36708.9
	mar-11	335359	913808		37475.01
	abr-11	465603	875572		40235.25
	may-11	394487	883875		38350.86

## &lt;&lt; Continuación &gt;&gt;

2011	jun-11	358391	890957		37480.44
	jul-11	336217	829923		34984.2
	ago-11	332290	869865		36064.65
	sep-11	339399	893049		36973.44
	oct-11	322916	884773		36230.67
	nov-11	352472	893146		37368.54
	dic-11	376019	902270		38348.67
2012	ene-12	364922	869049		37019.13
	feb-12	335769	898401		37025.1
	mar-12	334050	917088		37534.14
	abr-12	327001	847683		35240.52
	may-12	385680	894343		38400.69
	jun-12	365854	892006		37735.8
	jul-12	149234	1052619		36055.59
	ago-12		1221493		36644.79
	sep-12		1211973		36359.19
	oct-12		1228521		36855.63
	nov-12		1285584		38567.52
	dic-12		1277397		38321.91
2013	ene-13		1327838		39835.14
	feb-13		1305015		39150.45
	mar-13		1205455		36163.65
	abr-13		1284852		38545.56
	may-13		1295309		38859.27
	jun-13		1293206		38796.18
	jul-13		1267402		38022.06
	ago-13		1263375		37901.25
	sep-13		1218253		36547.59
	oct-13		1282016		38460.48
	nov-13		1333201		39996.03
	dic-13		1294793		38843.79

**ANEXO 4: Número de casos por enfermedades respiratorias, por año y zona.**

Zona	2002	2003	2004	2005	2006	2007
Lima centro	194344	141770	172995	169048	182205	166411
Lima norte	83031	76508	69389	80587	86148	80092
Lima sur	130960	112345	113664	118976	119047	113975
Lima este	67985	64021	72489	70189	72684	75266

Zona	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Lima centro	159075	163400	166620	146381	140467	147431
Lima norte	75046	84040	81491	73510	74265	69526
Lima sur	110759	110335	113728	111119	100442	110520
Lima este	69424	64871	67427	61233	57915	58888

**ANEXO 5: Cuadro cronológico de la legislación relacionada al contenido de azufre en los combustibles diésel.**

Fecha de promulgación	Normativa	Principales aspectos
31 Oct 01	DS 047-2001-MTC	Límites máximos permisibles para emisiones contaminantes de los vehículos automotores.
07 Ago 03	Ley 28054	Marco general para la promoción de biocombustibles.
15 Feb 05	DS 012-2005-PCM	Dejar en suspenso hasta el 31 de diciembre de 2005, el acápite del DS 047-2001-MTC, sobre los valores de los LMP. El MEM en 45 días aprobará un cronograma de retiro de azufre en el diésel para uso automotor, compatible con las normas establecidas., considerando una meta final de 50 a 350 ppm como valor máximo de contenido de azufre.
06 Jul 05	DS 025-2005-EM	Aprobación del cronograma de reducción de azufre en los combustibles diésel 1 y 2, mayores a 2500 ppm a partir de los 60 días de la norma. Además prohíbe la importación de combustibles diésel N° 1 y 2 con contenido de azufre mayor a 2500 ppm. Indica el contenido de azufre (azufre total, % masa): Diésel 1: 0.3, diésel 2: 0.5 y diésel 2 especial: 0.05. A partir de 1 de enero de 2010 será de 0.005 % masa para los 3 tipos de diésel.
07 Oct 05	DS 041-2005-EM	Modifica el DS 025-2005-EM y da precisiones para una mayor coherencia técnica respecto al cronograma aprobado. No se indica variaciones respecto al contenido de azufre.
20 Mar 06	Ley 28694	A partir del 1 de enero de 2010, queda prohibida la comercialización de diésel con azufre mayor a 50 ppm, para consumo interno. A partir de la vigencia de la ley, queda prohibida importación de diésel N° 1 y 2 con azufre mayor a 2500 ppm y venta de diésel mayor a 5000 ppm para consumo interno. Plazo no mayor a 90 días, aprobar el reglamento.

<< Continuación >>

Fecha de promulgación	Normativa	Principales aspectos
20 Abr 07	DS 021-2007-EM	<p>Aprobación del reglamento para la comercialización de biocombustibles.</p> <p>Del 21 de abril del 2007, el diésel B100 y diésel B20 podrán ser comercializados por mayoristas a consumidores directos.</p> <p>Del 21 de abril del 2007 se podrá comercializar el diésel B2 en todo el país.</p> <p>Del 1 de enero del 2009, la comercialización de diésel B2 será obligatoria y reemplazará al diésel 2.</p> <p>Del 1 de enero del 2011, la comercialización del diésel B5 será obligatoria en todo el país, reemplazando al diésel B2.</p>
07 Abr 08	RM 165-2008-MEM/DM	<p>Calidad de diésel B2, B5 y B20 cumplan con la especificación del diésel 2 aprobada por DS 025-2005-EM y modificatorias.</p> <p>Métodos de ensayo para la medición de propiedades para los diésel B2, B5 y B20.</p>
04 Set 09	DS 061-2009-EM	<p>Criterios para determinar zonas geográficas donde se pueda comercializar diésel con azufre máximo de 50 ppm.</p> <p>Prohíbe comercializar diésel B2 con azufre mayor a 50 ppm en Lima y Callao, a partir del 1 de enero de 2010.</p> <p>Prohíbe uso de diésel B2 con azufre mayor a 50 ppm por consumidores directos que lo usen como combustible automotriz, en Lima y Callao, a partir del 1 de enero de 2010.</p>
30 Dic 09	DS 092-2009-EM	<p>Modifica el DS 041-2005-EM e indica que del 1 de enero del 2010 aplicará en zonas donde sea obligatorio el uso de diésel B2 (DB2-s50) un azufre total de 50 ppm, y de B100 un 2% en volumen. A partir del 1 de enero del 2011 se incrementará el volumen de B100 a 5% en volumen.</p> <p>Periodo de transición de 60 días a partir del 1 de enero de 2010 para la comercialización de diésel B2 en Lima y Callao.</p>
16 Mar 12	RM 139-2012-MEM/DM	<p>Prohíbe comercializar diésel B5 con azufre mayor a 50 ppm en Lima, Callao y otros departamentos en un plazo máximo de 120 días.</p>

## ANEXO 6: Cálculos realizados en el programa R.

```
> plot(datos)
> modelo=lm(datos~.,data=datos)
Error in model.frame.default(formula = datos ~ ., data = datos, drop.unused.levels = TRUE) :
  invalid type (list) for variable 'datos'
> modelo=lm(SO2~.,data=datos)
> summary(modelo)

Call:
lm(formula = SO2 ~ ., data = datos)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-14.8318  -4.7619  -0.5277   4.6935  19.4142

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  14.47907     8.93352   1.621  0.1136
azufre       0.71665     0.24242   2.956  0.0054 **
demanda     -0.01828     0.03032  -0.603  0.5501
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 8.342 on 37 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.6327,    Adjusted R-squared:  0.6128
F-statistic: 31.87 on 2 and 37 DF,  p-value: 8.976e-09
```

MENSUAL – 3 VARIABLES, 2005-2013 (SO<sub>2</sub>)

```
> datos=read.table("datosR.txt", TRUE)
> plot(datos)
> modelo=lm(SO2~.,data=datos)
> summary(modelo)

Call:
lm(formula = SO2 ~ ., data = datos)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-3.6589 -2.3084 -0.8753  0.7769  6.9912

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  -6.09710     7.15263  -0.852  0.40941
azufre       -25.89238    11.84987  -2.185  0.04779 *
demanda       0.08367     0.02385   3.508  0.00385 **
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 3.376 on 13 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.5173,    Adjusted R-squared:  0.443
F-statistic: 6.966 on 2 and 13 DF,  p-value: 0.008788
```

MENSUAL – 3 VARIABLES, 2011-2013 (SO<sub>2</sub>)

```

6      42.9266 10.9242  8.0806 37.7929
7      39.2243  7.6186  7.3432 37.0612
8      37.3089 11.9417  6.8765 37.1467
9      38.6365 13.5187  6.6373 38.4772
> plot(enferm)
> modelo=lm(enfermedades~.,data=enferm)
> summary(modelo)

Call:
lm(formula = enfermedades ~ ., data = enferm)

Residuals:
    1     2     3     4     5     6     7     8     9
-0.79820  0.80843 -0.08156 -0.71122  0.99633  3.29233 -0.50362 -2.40089
-0.60159

Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  51.54936   40.91625   1.260   0.263
SO2           0.01791    0.18665   0.096   0.927
azufre       0.14051    0.24439   0.575   0.590
demanda     -0.35049    1.04977  -0.334   0.752

Residual standard error: 2.001 on 5 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.6849,    Adjusted R-squared:  0.4958
F-statistic: 3.623 on 3 and 5 DF,  p-value: 0.09986

```

#### ANUAL – 4 VARIABLES (ENFERMEDADES)

```

Call:
lm(formula = enfermedades ~ ., data = enferm3)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-2.5782 -1.2029  0.1500  0.3093  3.2097

Coefficients:
              Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  37.88956    1.23380  30.710 1e-08 ***
SO2           0.16727    0.04734   3.533 0.00956 **
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 1.806 on 7 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.6407,    Adjusted R-squared:  0.5894
F-statistic: 12.48 on 1 and 7 DF,  p-value: 0.009557

> |

```

#### ANUAL – 2 VARIABLES (ENFERMEDADES)