



EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE EN LIMA METROPOLITANA 2013

Dirección General de Investigación y Asuntos Ambientales

Dirección de Proyectos de Desarrollo y Medio Ambiente





PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Servicio Nacional de
Meteorología e Hidrología
del Perú - SENAMHI

Dirección General
de Investigación
y Asuntos Ambientales

EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE EN LIMA METROPOLITANA, 2013

Coordinador técnico:

José Segundo Silva Cotrina

Elaborado por:

Ph. D. Contaminación del aire
Ingeniera ambiental
Ingeniero ambiental
Bachiller en ingeniería ambiental

Odón Román Sánchez Ccoyllo
Carol Geimy Ordóñez Aquino
José Daniel Ibarra Basurto
Rulman Raphael Aliaga Martínez

Colaboración:

Ph. D. Medio ambiente y
desarrollo sostenible
Técnico electrónico
Técnica en computación

Juan Julio Ordóñez Gálvez
Carlos Pardavé Trujillo
Rosalinda Aguirre Almeyda

Lima, 2015



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Servicio Nacional de
Meteorología e Hidrología
del Perú - SENAMHI

Dirección General
de Investigación
y Asuntos Ambientales

EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE EN LIMA METROPOLITANA, 2013

© Dirección de Proyectos de Desarrollo y Medio Ambiente de la Dirección General de Investigación y Asuntos Ambientales del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI)

Jr. Cahuide 785, Jesús María, Lima, Perú

Central telefónica: (511) 614 1414

Correo electrónico: dgia@senamhi.gob.pe

Sitio web: <http://www.senamhi.gob.pe>

Se permite la reproducción parcial o total, tratamiento informático, transmisión por cualquier forma o medio, sea electrónico, mecánico, por fotocopia u otros, con la simple indicación de la fuente.

Este estudio debe citarse de la siguiente forma:

Sánchez-Ccoyllo, O.; Ordóñez-Aquino, C.; Ibarra-Basurto, J. y Aliaga-Martínez, R. (2015). *Evaluación de la calidad del aire en Lima Metropolitana, 2013*. Lima: SENAMHI.



Presentación

Para contribuir a lograr que Lima Metropolitana sea una ciudad sostenible, la Dirección de Proyectos de Desarrollo y Medio Ambiente del SENAMHI realiza la vigilancia de la calidad del aire mediante la operación de una red observacional conformada por diez estaciones automáticas en el año 2015. Esta red permite obtener información sobre la variabilidad y comportamiento de los contaminantes atmosféricos (gases y partículas) para generar, validar y verificar los pronósticos de la calidad del aire mediante la aplicación del modelo químico-dinámico CCATT-BRAMS¹, así como para elaborar boletines informativos y estudios de la calidad del aire.

El presente documento técnico muestra la evolución de la variabilidad espacial y temporal de la contaminación atmosférica por partículas PM₁₀, es decir, partículas suspendidas en el aire con un diámetro igual o menor de 10 micrómetros y por gases como el dióxido de azufre (SO₂), el dióxido de nitrógeno (NO₂) y el ozono superficial (O₃) medidos en las estaciones de calidad del aire localizadas en los distritos de Ate, San Borja, Jesús María, Santa Anita y Villa María del Triunfo en el año 2013, ya que en ese año solo se contaba con las cinco estaciones de calidad del aire mencionadas

Los pronósticos de calidad del aire de Lima Metropolitana se publican diariamente en la página web: http://www.senamhi.gob.pe/calidad_aire.php

Ph. D. Odón Román Sánchez Ccoyllo
Director de Proyectos de Desarrollo y Medio Ambiente del SENAMHI

¹ Coupled Chemistry Aerosol and Tracer Transport model to the Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System.



PERÚ

Ministerio
del Ambiente

Servicio Nacional de
Meteorología e Hidrología
del Perú - SENAMHI

Dirección General
de Investigación
y Asuntos Ambientales



Contenido

1. INTRODUCCIÓN	8
2. RED AUTOMÁTICA DE MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AIRE DEL SENAMHI	9
2.1. Información técnica	9
2.1.1. Estación Ate	9
2.1.2. Estación San Borja	10
2.1.3. Estación Jesús María	11
2.1.4. Estación Santa Anita	12
2.1.5. Estación Villa María del Triunfo	13
2.2. Indicadores de operación y desempeño	14
2.3. Porcentaje de captura de datos	14
2.3.1. Porcentaje de datos válidos	15
3. CALIDAD DEL AIRE EN LIMA METROPOLITANA, 2013	18
3.1. Material particulado (PM₁₀)	18
3.1.1. Evolución horaria del PM₁₀ en los días de la semana	18
3.1.2. Evolución diaria del PM₁₀ en los días de la semana	19
3.1.3. Evolución diaria del PM₁₀ en la Estación Ate	21
3.1.4. Evolución diaria del PM₁₀ en la Estación San Borja	21
3.1.5. Evolución diaria del PM₁₀ en la Estación Jesús María (Campo de Marte)	22
3.1.6. Evolución diaria del PM₁₀ en la Estación Santa Anita	22
3.1.7. Evolución diaria del PM₁₀ en la Estación Villa María del Triunfo	23
3.1.8. Estado mensual de la calidad del aire basado en PM₁₀ - Estación Ate	25
3.1.9. Estado mensual de la calidad del aire basado en PM₁₀ - Estación San Borja	25
3.1.10. Estado mensual de la calidad del aire basado en PM₁₀ - Estación Jesús María	26
3.1.11. Estado mensual de la calidad del aire basado en PM₁₀ - Estación Santa Anita	27
3.1.12. Estado mensual de la calidad del aire basado en PM₁₀ - Estación Villa María del Triunfo	27
3.1.13. Evolución mensual del PM₁₀ por estaciones de calidad del aire	28
3.1.14. Días de superación del ECA de PM₁₀	29
3.1.15. Evolución anual de PM₁₀ por estaciones de calidad del aire	30



3.2.	<u>Dióxido de azufre (SO₂)</u>	31
3.2.1.	<u>Evolución horaria del SO₂ en los días de la semana</u>	31
3.2.2.	<u>Evolución diaria del SO₂ en los días de la semana</u>	32
3.2.3.	<u>Evolución diaria del SO₂ en la Estación Ate</u>	33
3.2.4.	<u>Evolución diaria del SO₂ en la Estación San Borja</u>	34
3.2.5.	<u>Evolución diaria del SO₂ en la Estación Jesús María (Campo de Marte)</u>	34
3.2.6.	<u>Evolución diaria de SO₂ en la Estación Santa Anita</u>	35
3.2.7.	<u>Evolución diaria de SO₂ en la Estación Villa María del Triunfo</u>	35
3.2.8.	<u>Evolución mensual del SO₂ por estaciones de calidad del aire</u>	36
3.3.	<u>Dióxido de nitrógeno (NO₂)</u>	37
3.3.1.	<u>Evolución horaria del NO₂ en los días de la semana</u>	37
3.3.2.	<u>Evolución diaria del NO₂ en los días de la semana</u>	39
3.3.3.	<u>Evolución horaria del NO₂ en la Estación Ate</u>	39
3.3.4.	<u>Evolución horaria del NO₂ en la Estación Jesús María (Campo de Marte)</u>	41
3.3.5.	<u>Evolución horaria del NO₂ en la Estación Villa María del Triunfo</u>	42
3.3.6.	<u>Evolución mensual del NO₂ por estaciones calidad del aire</u>	43
3.3.7.	<u>Evolución anual de NO₂ por estaciones de calidad del aire</u>	43
3.4.	<u>Ozono (O₃)</u>	44
3.4.1.	<u>Evolución horaria del O₃ en los días de la semana</u>	44
3.4.2.	<u>Evolución diaria del O₃ en los días de la semana</u>	46
3.4.3.	<u>Evolución de medias móviles de 8 horas de ozono en la Estación Ate</u>	47
3.4.4.	<u>Evolución de medias móviles de 8 horas de ozono en la Estación San Borja</u>	48
3.4.5.	<u>Evolución de medias móviles de 8 horas de ozono en la Estación Jesús María (Campo de Marte)</u>	48
3.4.6.	<u>Evolución de medias móviles de 8 horas de ozono en la Estación Santa Anita</u>	49
3.4.7.	<u>Evolución de medias móviles de 8 horas de ozono en la Estación Villa María del Triunfo</u>	50
3.4.8.	<u>Evolución mensual del O₃ por estaciones de calidad del aire</u>	50
4.	<u>CONDICIONES METEOROLÓGICAS</u>	51
4.1.	<u>Capa de mezcla</u>	51
4.2.	<u>Temperatura</u>	53
4.3.	<u>Humedad relativa</u>	55



4.4. Precipitación 56

4.5. Vientos 57

5. CONCLUSIONES 58

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 61



1. INTRODUCCIÓN

El SENAMHI es uno de los 188 servicios meteorológicos reconocidos por la Organización Meteorológica Mundial (OMM), por lo cual cumple con las acciones establecidas en los convenios sobre composición atmosférica, como la Convención sobre la Contaminación Atmosférica Transfronteriza a Larga Distancia (LRTAT, por sus siglas en inglés) de la Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas (1979), el Convenio de Viena para la Protección de la Capa de Ozono (1985) y la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (1994).

En cumplimiento de su ley orgánica, el SENAMHI ejecuta la vigilancia de las condiciones meteorológicas y de los contaminantes atmosféricos.

Para cuantificar y evaluar el comportamiento de los contaminantes atmosféricos de manera espacial y temporal, en la ciudad de Lima se opera una red que en el año 2015 cuenta con diez estaciones automáticas de calidad del aire, lo que contribuye a generar conocimientos sobre los procesos físicos y químicos involucrados.

El presente documento técnico muestra la evolución de la variabilidad espacial y temporal de la contaminación atmosférica por partículas PM_{10} , es decir, partículas suspendidas en el aire con un diámetro igual o menor de 10 micrómetros y por gases como el dióxido de azufre (SO_2), el dióxido de nitrógeno (NO_2) y el ozono superficial (O_3) medidos en las estaciones de calidad del aire localizadas en los distritos de Ate, San Borja, Jesús María, Santa Anita y Villa María del Triunfo en el año 2013, ya que en ese año solo se contaba con las cinco estaciones de calidad del aire mencionadas.

2. RED AUTOMÁTICA DE MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AIRE DEL SENAMHI

2.1. Información técnica

Las estaciones de monitoreo de la calidad del aire del SENAMHI se encuentran a cargo de la Dirección de Proyectos de Desarrollo y Medio Ambiente de la Dirección General de Investigación y Asuntos Ambientales. A continuación, se presenta el detalle de cada una de ellas.

2.1.1. Estación Ate

Coordenadas geográficas	Latitud: 8669823	Longitud: 291097
Tipo de zona	Urbana	
Dirección	Carretera Central km 7.5 (Plaza de Armas de Ate)	
Localización de la toma de muestra	Plaza de Armas de Ate	
Altura de la toma de muestra	3 m	

Parámetros	Marca del equipo	Principio de funcionamiento
PM ₁₀	Thermo TEOM1405	Microbalanza oscilatoria
SO ₂	Teledyne 300E	Fluorescencia UV
NO ₂	Teledyne 200E	Quimioluminiscencia
O ₃	Teledyne 400E	Fotometría UV



2.1.3. Estación Jesús María

Coordenadas geográficas	Latitud: 8664893	Longitud: 277601
Tipo de zona	Urbana	
Dirección	Jr. Nazca s/n. (Parque Campo de Marte)	
Localización de la toma de muestra	Parque	
Altura de la toma de muestra	3 m	

Parámetros	Marca del equipo	Principio de funcionamiento
PM ₁₀	Thermo TEOM1405	Microbalanza oscilatoria
SO ₂	Teledyne 300E	Fluorescencia UV
NO ₂	Teledyne 200E	Quimioluminiscencia
O ₃	Teledyne 400E	Fotometría UV



2.1.4. Estación Santa Anita

Coordenadas geográficas	Latitud: 8667937	Longitud: 285325
Tipo de zona	Urbana	
Dirección	Av. Los Eucaliptos cdra. 12 (Palacio Municipal)	
Localización de la toma de muestra	Azotea del Palacio Municipal	
Altura de la toma de muestra	13 m	

Parámetros	Marca del equipo	Principio de funcionamiento
PM ₁₀	Thermo TEOM1405	Microbalanza oscilatoria
SO ₂	Teledyne 300E	Fluorescencia UV
NO ₂	Teledyne 200E	Quimioluminiscencia
O ₃	Teledyne 400E	Fotometría UV



2.1.5. Estación Villa María del Triunfo

Coordenadas geográficas	Latitud: 291077	Longitud: 8654306
Tipo de zona	Urbana	
Dirección	Av. 26 de Noviembre s/n - Sector Nueva Esperanza (Parque Virgen de Lourdes)	
Localización de la toma de muestra	Parque	
Altura de la toma de muestra	3 m	

Parámetros	Marca del equipo	Principio de funcionamiento
PM ₁₀	Thermo TEOM1405	Microbalanza oscilatoria
SO ₂	Thermo 43i	Fluorescencia UV
NO ₂	Teledyne 200E	Quimioluminiscencia
O ₃	Thermo 49i	Fotometría UV





2.2. Indicadores de operación y desempeño

Para generar indicadores representativos del comportamiento de un contaminante se evalúa el desempeño anual, que se define como el porcentaje de datos válidos de cada estación de monitoreo en un año.

El desempeño anual de una estación de monitoreo se calificará como bueno cuando registre el 75 % o más de datos válidos; regular cuando registre el 50 % o más de los datos sin llegar al 75%; y malo cuando registre menos del 50 % de datos válidos. En el **Cuadro 1** se indica la cantidad de datos considerados para cada categoría en años bisiestos y no bisiestos.

Cuadro 1. Categorías de desempeño anual

EQUIPO DE MONITOREO	TIPO DE DATO	DATOS HORARIOS VÁLIDOS		
		MALO (<50%)	REGULAR (>=50% y <75%)	BUENO (>= al 75%)
Automático	Horario	0 - 4391 Año bisiesto	4392 - 6587 Año bisiesto	6588 - 8784 Año bisiesto
		0 - 4379 Año no bisiesto	4380 - 6569 Año no bisiesto	6570 - 8760 Año no bisiesto

2.3. Porcentaje de captura de datos

A continuación, se presenta el indicador de operación de la Red de Monitoreo de la Calidad del Aire para el año 2013, a través de los porcentajes de la captura de datos horarios totales (válidos e inválidos), los cuales se obtuvieron por conexión ftp (internet), cable serial RS232 y manual (USB).

En la **Figura 1**, se aprecia el resultado de la captura total de datos (válidos e inválidos) por estaciones de calidad del aire y los respectivos contaminantes monitoreados; se observó claramente que las estaciones de Ate y Villa María del Triunfo presentaron porcentajes más altos de captura de datos respecto a las demás; en Jesús María (Campo de Marte) también se obtuvo un porcentaje aceptable de los contaminantes con excepción del SO₂, debido a problemas técnicos del analizador ocurridos desde abril que forzaron su desinstalación; en las estaciones de San Borja y Santa Anita no se obtuvieron datos de NO₂, debido a que el analizador estuvo apagado todo el año por fallas técnicas continuas.

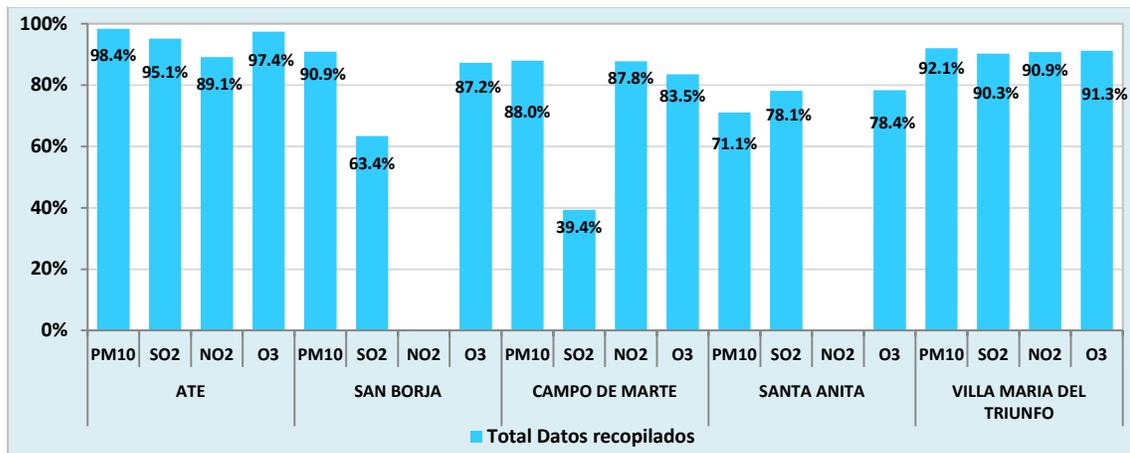


Figura 1. Porcentaje de captura de datos

2.3.1. Porcentaje de datos válidos

El porcentaje de datos válidos es un indicador que permite evaluar el desempeño de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire mediante la validación de los datos horarios y la identificación de la confiabilidad o invalidez de los datos. Para ello, se tomaron en cuenta los procedimientos y criterios técnicos que se detallan a continuación:

- Incidencias técnicas de los analizadores que se detectan por irregularidades de los parámetros físicos de operación, los cuales no deben estar fuera de los límites aceptables para considerar que los datos son confiables.
- Identificación de datos negativos y ceros. Debido a las características y condiciones de la calidad del aire no se deben presentar concentraciones negativas ni ceros para los contaminantes criterio. Estas concentraciones atípicas se producen, debido a que en ciertos momentos los analizadores demoran unas horas para estabilizarse y toman como referencia valores cercanos a cero.
- Rangos físicos: Permiten identificar datos atípicos fuera del rango que ha sido determinado por la serie histórica.
- Coherencia interna: Verifica las relaciones físicas y químicas existentes entre algunos parámetros, principalmente PM_{10} , $PM_{2.5}$ y NO_2 .
- Estacionalidad: Este criterio se refiere a la fluctuación de las concentraciones en periodos de tiempo, lo que permite el análisis mensual, semanal, diario y horario. La estacionalidad varía en cada estación de monitoreo y según el contaminante; se



relaciona de manera directa o indirectamente proporcional con los parámetros y fenómenos meteorológicos (velocidad y dirección del viento, temperatura, precipitación, humedad relativa, radiación solar, inversión térmica, etc.).

La **Figura 2** muestra el resultado del desempeño de la Red de Monitoreo que se evalúa a través de la identificación de los porcentajes de datos buenos, malos y ausencia de datos, que se detalla a continuación:

En la Estación Ate, el mejor porcentaje de operatividad fue del monitor de partículas TEOM (PM_{10}) con 96.1 % de datos buenos, 2.3 % de datos malos y 1.6 % sin datos; los analizadores de gases de SO_2 , NO_2 y O_3 también registraron un alto porcentaje de datos válidos por encima del 75 %, es decir, en la Estación Ate, el desempeño de los equipos automáticos fue bueno, porque registraron información válida que supera el 75 % de datos horarios durante el año.

En la Estación San Borja, solo los equipos de PM_{10} y O_3 reportaron información confiable por encima del 75 %, por lo que se consideran entonces con un desempeño bueno, caso contrario del equipo de SO_2 con el que solo se obtuvo el 36.9 % de datos buenos y un alto porcentaje de datos malos, debido principalmente a la falta de repuestos que garanticen su buen funcionamiento; en consecuencia, su operación tuvo un desempeño malo. En el caso del equipo de NO_2 , no se cuenta con información, debido a que estuvo apagado todo el año por falta de repuestos para su reparación.

En la Estación Jesús María (Campo de Marte), los equipos de PM_{10} , NO_2 y O_3 cuentan con datos confiables que superan el 75 % y por consiguiente su desempeño fue bueno, a diferencia del analizador de SO_2 que solo obtuvo 18.8 % de datos buenos y 60.6 % de datos ausentes, debido a que estuvo apagado desde fines de abril hasta la fecha por la falta de repuestos, por consiguiente, su desempeño de operación fue malo.

En la Estación Santa Anita, los equipos de PM_{10} , SO_2 y O_3 obtuvieron un desempeño regular, ya que los datos válidos de cada uno de ellos estuvieron entre el 50 % y 75 %. El equipo de NO_2 no cuenta con datos, debido a que estuvo apagado todo el año por falta de repuestos para su reparación.

En la Estación Villa María del Triunfo, los equipos de PM_{10} y NO_2 reportaron datos válidos por encima del 75 %, por lo que se consideran entonces con un desempeño bueno, a diferencia de los equipos de SO_2 y O_3 , cuyo desempeño fue malo, debido a que los datos válidos estuvieron por debajo del 50 % como consecuencia de la falta de insumos para la calibración.

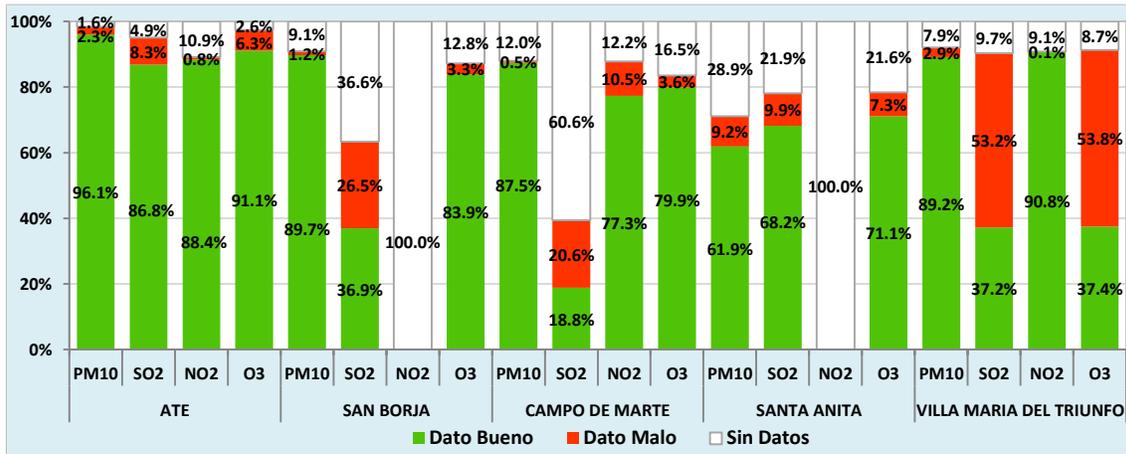


Figura 2. Porcentaje de datos válidos



3. CALIDAD DEL AIRE EN LIMA METROPOLITANA, 2013

3.1. Material particulado (PM₁₀)

3.1.1. Evolución horaria del PM₁₀ en los días de la semana

En la **Figura 3**, se muestra la evolución horaria de las concentraciones de PM₁₀ en los días de la semana del año 2013, registradas en las estaciones de calidad del aire ubicadas en los distritos de Ate, San Borja, Jesús María (Campo de Marte), Santa Anita y Villa María del Triunfo.

Las estaciones de Ate, Villa María del Triunfo y Santa Anita registraron mayores concentraciones horarias de PM₁₀ en comparación con las estaciones de San Borja y Jesús María (Campo de Marte), debido a la influencia de los vientos dominantes en la dispersión de los contaminantes para dichas zonas.

En horas de la madrugada (00:00 hasta las 05:00 horas), las concentraciones máximas en los distritos de Villa María del Triunfo, Ate y Santa Anita alcanzaron 162.2 µg/m³, 123.8 µg/m³ y 123.3 µg/m³, respectivamente. En cambio, en los distritos de San Borja y Campo de Marte presentaron 67.7 µg/m³ y 53 µg/m³, respectivamente.

En horas de la mañana (06:00 hasta las 12:00 horas), las concentraciones máximas en los distritos de Villa María del Triunfo, Ate y Santa Anita fueron de 195.1 µg/m³, 177.1 µg/m³ y 156.5 µg/m³, respectivamente. En cambio, en los distritos de San Borja y Campo de Marte las concentraciones máximas alcanzaron 84.2 µg/m³ y 75.7 µg/m³, respectivamente.

En horas de la tarde (13:00 hasta las 18:00 horas), los distritos de Villa María del Triunfo, Ate y Santa Anita presentaron concentraciones máximas de 170.6 µg/m³, 119.1 µg/m³ y 110.8 µg/m³, respectivamente. En cambio, en los distritos de San Borja y Campo de Marte las concentraciones máximas fueron de 64.4 µg/m³ y 56.8 µg/m³, respectivamente.

En horas de la noche (19:00 hasta las 23:00 horas), las concentraciones máximas en los distritos de Villa María del Triunfo, Ate y Santa Anita fueron 169.9 µg/m³, 131.3 µg/m³ y 131.2 µg/m³, respectivamente. En los distritos de San Borja y Campo de Marte, las concentraciones máximas alcanzaron 78.9 µg/m³ y 63.6 µg/m³, respectivamente.

Las horas pico de concentraciones máximas alcanzadas durante las madrugadas fueron entre las 00:00 y 01:00 horas; en las mañanas fueron entre las 09:00 y 10:00 horas; en las

tardes fueron a las 13:00 horas y en algunas ocasiones a las 18:00 horas, mientras que en las noches fueron entre las 22:00 y 23:00 horas.

Como se puede apreciar, durante las mañanas y las tardes, las concentraciones máximas de PM₁₀ estarían asociadas a las horas en que la congestión vehicular es alta, debido al traslado de la población a sus centros de labores o de estudios que generalmente exigen horarios de ingreso entre las 7:00 y 8:00 horas. Ello provoca que el PM₁₀, cuyo tiempo de residencia en la atmósfera es de minutos a horas, se acumule en la atmósfera hasta alcanzar su máxima concentración en las horas antes indicadas (9:00 y 10:00 horas) para luego disminuir, debido a los procesos de deposición seca o húmeda.

Lo mismo estaría ocurriendo en las noches y madrugadas, cuando la atmósfera es estable con vientos de calma a muy débiles, que propiciarían la suspensión de las partículas en el aire en dichas horas.

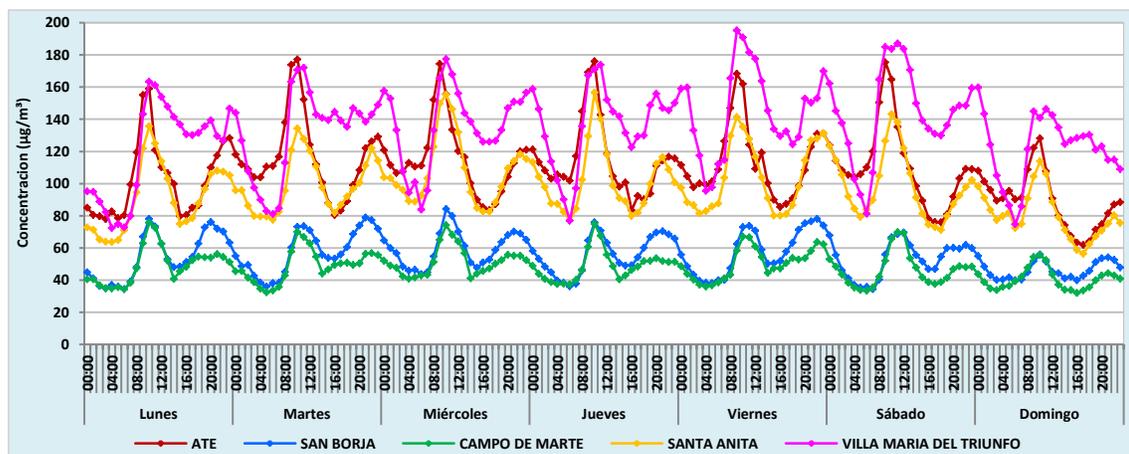


Figura 3. Evolución horaria del PM₁₀ en los días de la semana

3.1.2. Evolución diaria del PM₁₀ en los días de la semana

La **Figura 4** muestra el comportamiento de las concentraciones de PM₁₀ en días de la semana del año 2013 con las siguientes características:

- La Estación Villa María del Triunfo presentó mayores concentraciones de PM₁₀, con una variación de 120 µg/m³ (el día lunes) a 145 µg/m³ (el día viernes).

- La Estación Ate presentó una alta concentración de PM₁₀, con una variación de 89 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (el día domingo) a 116 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (el día martes).
- La Estación Santa Anita reportó concentraciones medias, con una variación de 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (el día domingo) a 108 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (el día miércoles).
- La Estación San Borja presentó concentraciones bajas de PM₁₀, con una variación de 46 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (el día domingo) a 59 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (el día miércoles).
- La Estación Jesús María (Campo de Marte) reportó concentraciones más bajas de PM₁₀, con una variación de 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (el día domingo) a 52 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (el día miércoles).

En todas las estaciones se reportan concentraciones de PM₁₀ que se mantienen altas durante los días laborables y descienden en los fines de semana, lo cual se atribuye a la reducción de las actividades de la población por ser días no laborables.

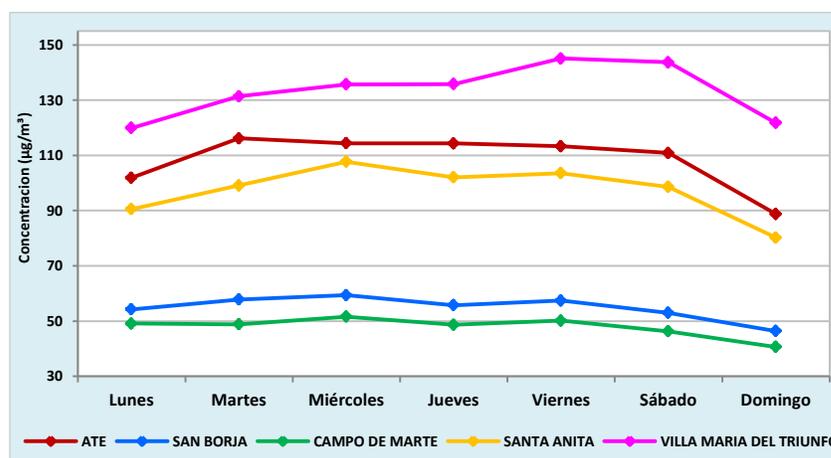


Figura 4. Evolución diaria del PM₁₀ en los días de la semana

3.1.3. Evolución diaria del PM₁₀ en la Estación Ate

La **Figura 5** detalla la variación diaria del material particulado menor de 10 micrómetros (PM₁₀) de la Estación Ate en el 2013; se aprecia que en el día de Año Nuevo la concentración fue de 125.2 µg/m³, lo que implica una disminución considerable en relación con las mismas fechas de los años 2011 y 2012 que fue de 268.4 y 294.8 µg/m³, respectivamente, debido a las garúas que se presentaron en el primer día del 2013. Se observó también que el incremento de las concentraciones en el año se dio principalmente en los meses de verano (febrero-marzo) y otoño (abril-mayo), se identificaron las tres máximas concentraciones diarias de 236.9 µg/m³, 223.0 µg/m³ y 219.7 µg/m³ en los meses de abril, mayo y marzo, respectivamente; y hubo un descenso considerable en los meses de invierno (julio-agosto). La superación del estándar nacional de calidad ambiental del aire (ECA) durante este año fue de 56 días de los 345 días de monitoreo, cuando la norma establece que no se debe exceder el ECA en 3 días durante un año.

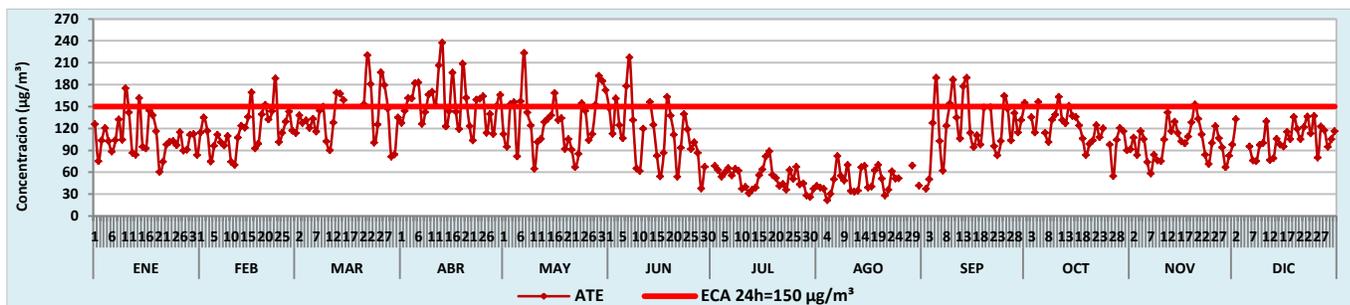


Figura 5. Evolución diaria del PM₁₀ en la Estación Ate

3.1.4. Evolución diaria del PM₁₀ en la Estación San Borja

La **Figura 6** detalla la variación diaria del PM₁₀ en la Estación San Borja en el 2013. Se observó que no hubo una tendencia estacional marcada, pues las concentraciones se mantuvieron principalmente entre 30 µg/m³ y 100 µg/m³ a lo largo de ciclo anual y alcanzó una máxima diaria de 132.8 µg/m³ en agosto. Asimismo, no se superó el ECA en los 325 días de monitoreo.

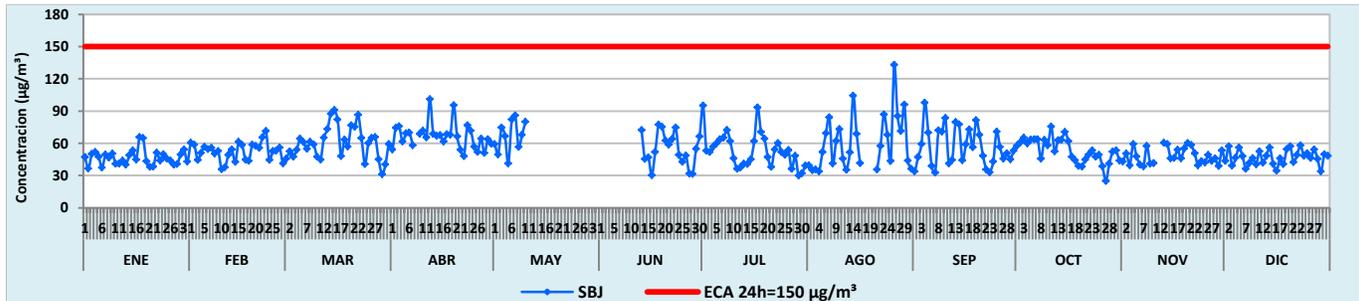


Figura 6 Evolución diaria del PM₁₀ en la Estación San Borja

3.1.5. Evolución diaria del PM₁₀ en la Estación Jesús María (Campo de Marte)

La **Figura 7** detalla la variación diaria del PM₁₀ en la Estación Jesús María (Campo de Marte) durante el 2013. Se aprecia que tampoco superó el estándar de calidad en los 315 días monitoreados y la oscilación de las concentraciones estuvo principalmente entre 30 µg/m³ y 90 µg/m³, con una máxima diaria de 142.4 µg/m³ en agosto.

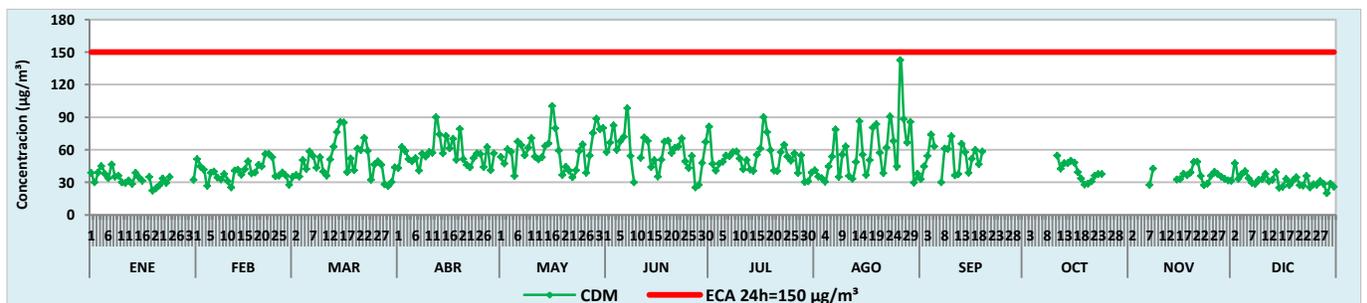


Figura 7. Evolución diaria del PM₁₀ en la Estación Jesús María

En la **Figura 8** se detalla la variación diaria del PM₁₀ de la Estación Santa Anita en el periodo 2013. Se aprecia que en el día de Año Nuevo la concentración fue de 85.6 µg/m³, lo que significa una disminución considerable en relación con la misma fecha del 2012, que fue de 199.1 µg/m³. Se observó, además, el incremento de concentraciones, principalmente en los meses de verano (febrero-marzo) y otoño (abril-mayo) y se identificaron dos máximas diarias de 208.3 µg/m³ y 202.2 µg/m³ en los meses de abril y marzo, respectivamente. Se superó en 21 días el estándar de calidad de los 225 días monitoreados, cuando la norma establece que no se debe exceder el ECA en 3 días durante un año.

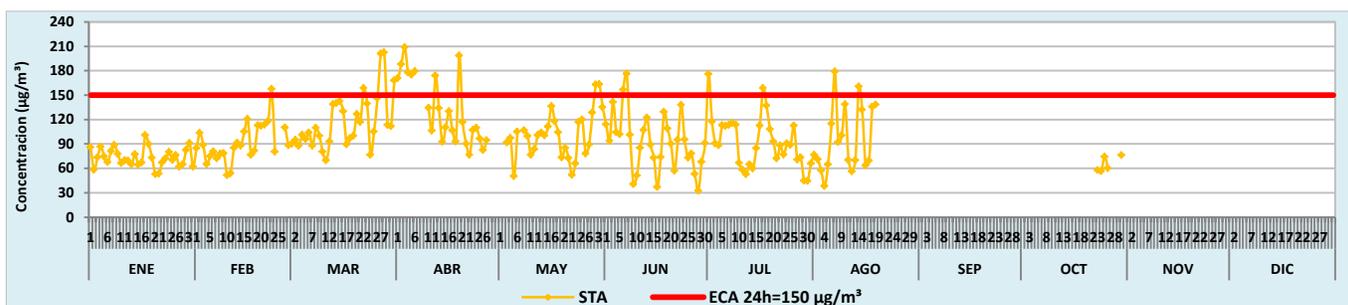


Figura 8. Evolución diaria del PM₁₀ en la Estación Santa Anita

3.1.6. Evolución diaria del PM₁₀ en la Estación Villa María del Triunfo

En la **Figura 9** se detalla la variación diaria del PM₁₀ en la Estación Villa María del Triunfo durante el 2013. Se aprecia que en el día de Año Nuevo la concentración fue de 113.6 µg/m³, muy por debajo del día de Año Nuevo del 2012, que fue de 289.8 µg/m³, debido a las garúas del primer día del 2013. También se observó que el incremento de las concentraciones durante el año se dio en los meses de verano (enero-marzo) y otoño (abril-mayo); se identificaron tres máximas diarias de 347.3 µg/m³, 328.8 µg/m³ y 328.5 µg/m³ que ocurrieron en los meses de abril, febrero y marzo, respectivamente. La superación del estándar de calidad en el 2013 fue de 110 días de los 320 monitoreados, cuando la norma establece que no se debe exceder el ECA en 3 días durante un año.

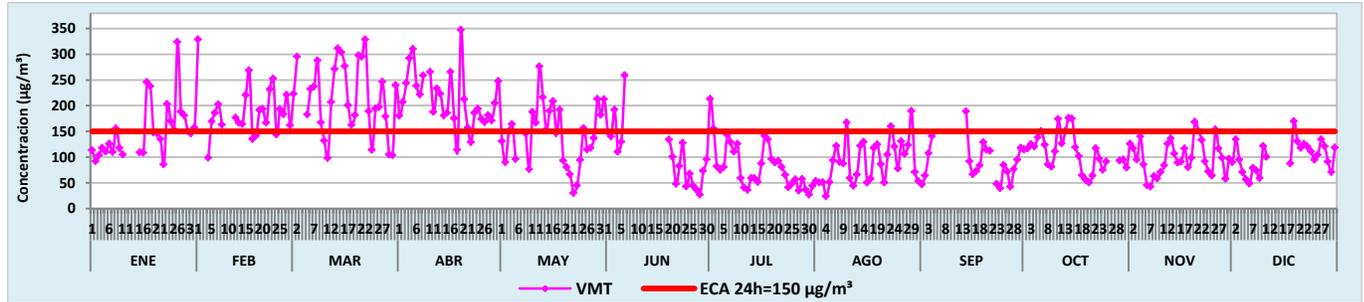


Figura 9. Evolución diaria del PM₁₀ en la Estación Villa María del Triunfo

3.1.7. Estado mensual de la calidad del aire basado en PM₁₀ - Estación Ate

La **Figura 10** muestra el estado mensual de la calidad del aire basado en PM₁₀ en Lima Este 1 - Ate. Se observa el predominio de días con estado moderado a lo largo del año y menor proporción de días con estado malo de marzo a mayo, principalmente. Solo durante la temporada fría se registraron días con estado de calidad bueno, sobre todo en julio y agosto con 13 y 15 días, respectivamente.

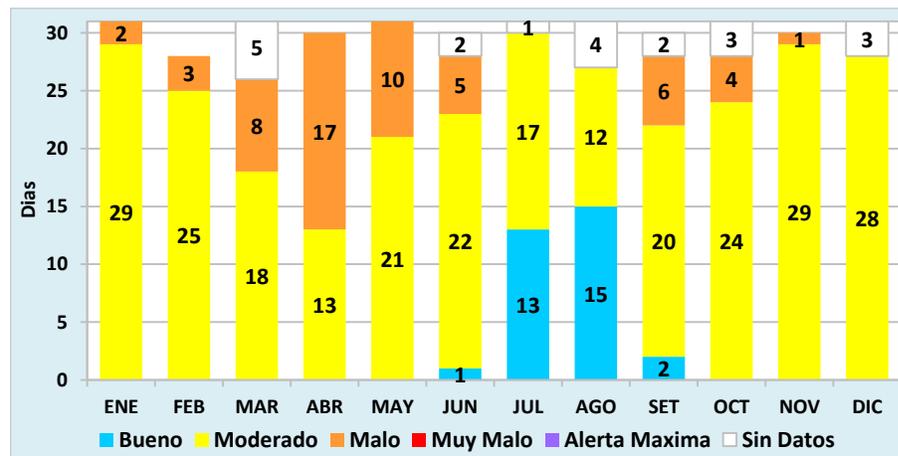


Figura 2. Estado mensual de la calidad del aire basado en PM₁₀ - Estación Ate

3.1.8. Estado mensual de la calidad del aire basado en PM₁₀ - Estación San Borja

En cuanto al estado de la calidad del aire basado en PM₁₀ en Lima Sur 1 - San Borja (**Figura 11**), se observó que a lo largo del 2013 solo se presentaron estados de calidad bueno y moderado. Los meses de febrero a abril tuvieron más días de estado moderado y los meses de enero y diciembre presentaron la mejor calidad del aire del año.

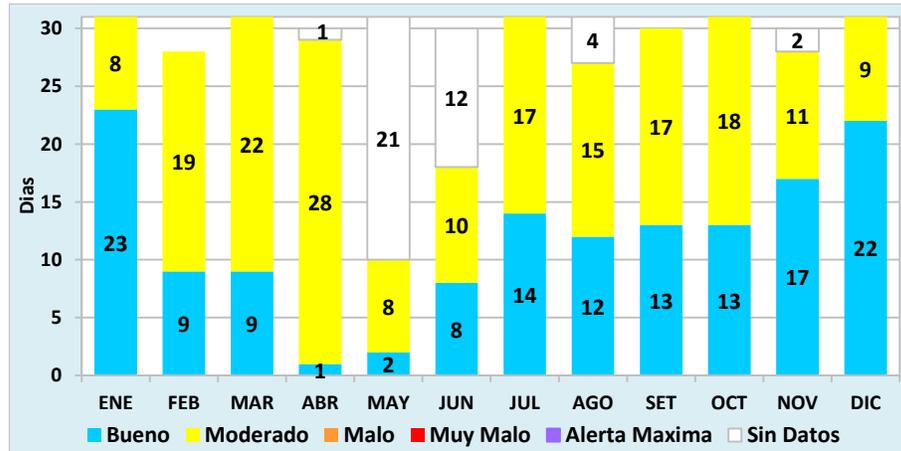


Figura 3. Estado mensual de la calidad del aire basado en PM₁₀ - Estación San Borja

3.1.9. Estado mensual de la calidad del aire basado en PM₁₀ - Estación Jesús María

La **Figura 12** muestra el estado mensual de la calidad del aire basado en PM₁₀ en Lima Centro - Jesús María (Campo de Marte). Se observa que en la temporada cálida predominan los días con estado bueno, mientras que a partir de los meses de otoño se observa un incremento de días con estado moderado.

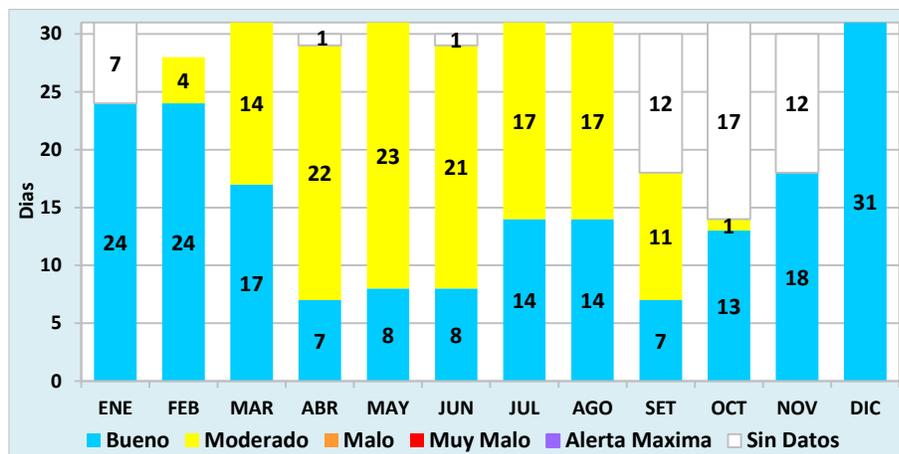


Figura 4. Estado mensual de la calidad del aire basado en PM₁₀ - Estación Jesús María

3.1.10. Estado mensual de la calidad del aire basado en PM₁₀ - Estación Santa Anita

En Lima Este 2 - Santa Anita (**Figura 13**) se puede apreciar que a lo largo del año el estado predominante es el de moderado, sobre todo en los meses de verano y otoño, con una presencia importante de días malos.

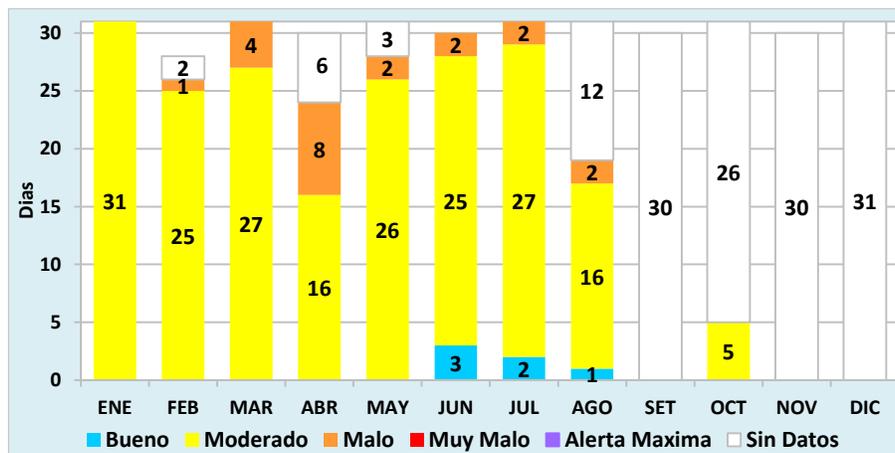


Figura 5. Estado mensual de la calidad del aire basado en PM₁₀ - Estación Santa Anita

3.1.11. Estado mensual de la calidad del aire basado en PM₁₀ - Estación Villa María del Triunfo

En Lima Sur 2 - Villa María del Triunfo, se observa que de febrero a abril se presentaron las condiciones más adversas con predominancia clara de estados malo y muy malo, mientras que en los meses siguientes va tomando predominancia el estado moderado con ligera presencia de días con estado bueno (**Figura 14**).

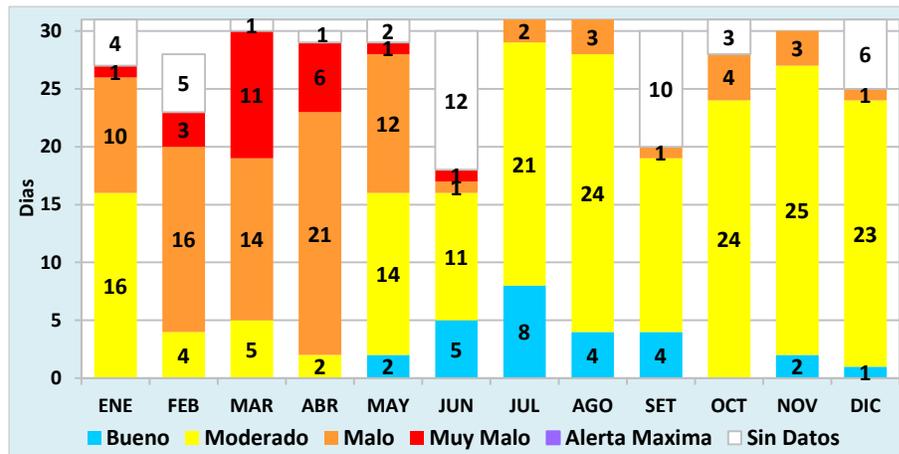


Figura 6. Estado mensual de la calidad del aire basado en PM₁₀ - Estación Villa María del Triunfo

3.1.12. Evolución mensual del PM₁₀ por estaciones de calidad del aire

Con respecto a las concentraciones medias mensuales de PM₁₀ durante el año 2013, en la **Figura 15** se observa que en las estaciones de Villa María del Triunfo, Ate y Santa Anita se presentaron concentraciones más elevadas en comparación con las de San Borja y Campo de Marte. Esta diferencia se podría deber a que las primeras se encuentran más próximas a fuentes de emisiones importantes, como vías vehiculares principales y actividades industriales, así como al transporte horizontal de contaminantes producto de los vientos predominantes del suroeste y el consecuente estancamiento de las masas de aire en los distritos del este y noreste.

La variación mensual muestra que las concentraciones máximas se registraron de marzo a mayo, con una progresiva disminución a medida que se acercan los meses de invierno. Esto está influenciado en parte porque durante esos meses la altura de la base de la inversión térmica alcanzó sus valores mínimos dentro del ciclo anual, lo que confina al aire por debajo de ella y contribuye a una mayor concentración del contaminante.

La tendencia a disminuir a medida que se acercan a los meses más fríos es más notoria en la estación de Villa María del Triunfo, que presentó la concentración más alta de todas las estaciones durante el periodo de verano, con un valor máximo de 215.8 µg/m³ en marzo y disminuyó hasta 82.3 µg/m³ en julio. Esta importante reducción de la concentración de PM₁₀ se debe a que la zona donde se ubica dicha estación alcanza altos valores de humedad y precipitación en los meses de invierno, lo que provoca el descenso por

deposición húmeda del material particulado en el aire. Un comportamiento similar se observó en la estación de Ate, donde se registró una concentración máxima de $154.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en abril y una mínima de $48.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en agosto.

Asimismo, en las estaciones de Santa Anita, San Borja y Campo de Marte, luego de alcanzar la máxima concentración mensual en la temporada cálida ($131.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $66.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $59.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente), se observó un descenso menos pronunciado en la temporada fría, debido a que en estos distritos las precipitaciones son menos intensas que en Villa María y Ate. Sin embargo, los valores mínimos se alcanzaron durante enero en Santa Anita y San Borja ($73.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $46.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente) y durante diciembre para el caso de Campo de Marte ($31.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Esto se debe a que durante esos meses se alcanzaron valores medios y altos de la altura de la inversión, con intensidades bajas y de carácter no persistente.

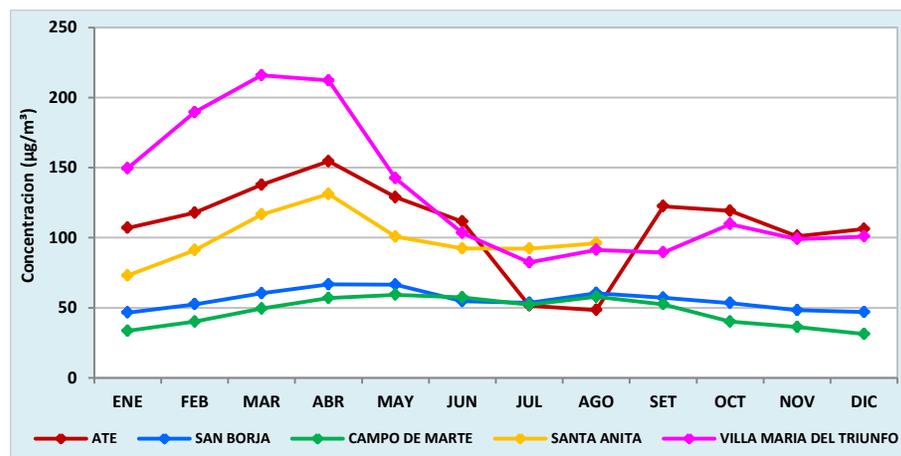


Figura 7. Evolución mensual del PM_{10} por estaciones de calidad del aire

3.1.13. Días de superación del ECA de PM_{10}

En la **Figura 16**, se presenta el número de días en que el PM_{10} superó el ECA diario en el transcurso del 2013. Como se puede apreciar, solo las estaciones de Villa María del Triunfo, Ate y Santa Anita superaron el ECA diario de PM_{10} ($150 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

El Decreto Supremo N° 074-2001-PCM “Estándar Nacional de Calidad Ambiental para el Aire” indica que la concentración promedio diaria del PM_{10} no debe superar el ECA más de tres veces al año; sin embargo, la estación ubicada en Villa María del Triunfo registró el mayor número de días de superación del ECA con un total de 110 días al año, mientras que Ate lo superó 56 días y Santa Anita 21 días en el año.

Tal como se apreció en la evolución mensual del PM₁₀, los meses de verano presentan un incremento gradual de las concentraciones que luego disminuye a medida que se pasa a la siguiente época del año; en dicha estación del año se identificó a abril como el mes con el mayor número de días de superación del ECA. Villa María del Triunfo contó con 27 días de superación, Ate con 17 y Santa Anita con 8 días.

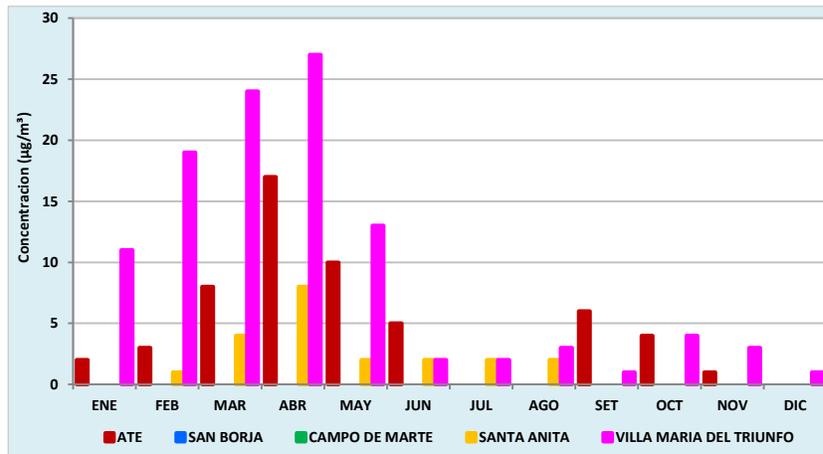


Figura 8. Días de superación del ECA de PM₁₀

3.1.14. Evolución anual del PM₁₀ por estaciones de calidad del aire

En las estaciones de Ate, Santa Anita y Villa María del Triunfo, los valores anuales de concentración de PM₁₀ son mayores que el valor del ECA anual de 50 µg/m³ (Figura 17). En la estación de Ate, el valor anual del PM₁₀ es de 108 µg/m³, 110 µg/m³ y 123 µg/m³, en los años 2011, 2012 y 2013, respectivamente. En Santa Anita, el valor anual del PM₁₀ varía de 80 µg/m³ a 99 µg/m³ en los años 2012 y 2013, respectivamente. En la estación de Villa María del Triunfo, el valor anual de PM₁₀ es de 118 µg/m³ y 132 µg/m³ en los años 2012 y 2013, respectivamente.

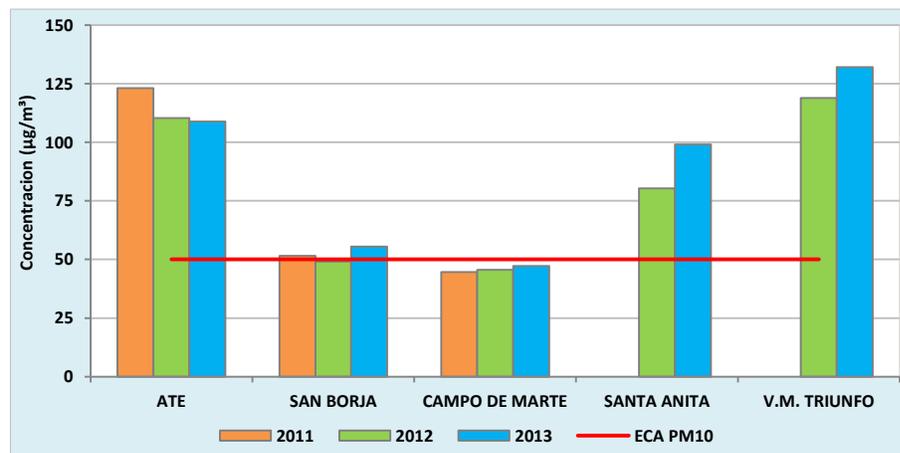


Figura 9. Evolución anual del PM₁₀ por estaciones de calidad del aire



3.2. Dióxido de azufre (SO₂)

3.2.1. Evolución horaria del SO₂ en los días de la semana

En la **Figura 18**, se puede observar la tendencia horaria del SO₂ durante cada día de la semana. Las concentraciones presentaron un pico máximo alrededor de las 9 y 10 horas, que luego desciende y, entre las 15 y 17 horas, empieza a aumentar nuevamente hasta alcanzar un segundo pico, aunque menor, entre las 21 y 0 horas. El incremento de las concentraciones se relaciona con el horario de mayor flujo vehicular, entre las 7 y 18 horas, aproximadamente.

Asimismo, se puede apreciar que el pico de concentración es más pronunciado en las estaciones de Ate y Santa Anita en comparación con las estaciones de Villa María del Triunfo, Campo de Marte y San Borja. Esto se debe a que las primeras estaciones se encuentran más próximas a vías de gran circulación vehicular, por lo que durante las horas punta el efecto en la concentración de SO₂ es mayor que en las últimas.

Por otro lado, se puede ver que las estaciones ubicadas al este de Lima Metropolitana (Santa Anita y Ate) son las que presentan mayor concentración horaria que las estaciones ubicadas al Sur (San Borja y Villa María del Triunfo) y Centro (Campo de Marte). Esto se debe a lo mencionado previamente, es decir, su proximidad a avenidas de alto flujo automotor, así como a la influencia de los vientos predominantes que soplan en dirección norte y noreste, y la topografía de la zona de estudio.

En cuanto al comportamiento de la concentración según el día de la semana, se puede observar que de lunes a sábado las concentraciones alcanzan picos más altos que durante el domingo en las estaciones de Ate, San Borja y Campo de Marte, mientras que en Santa Anita esta tendencia no es tan notoria, siendo la Estación Villa María del Triunfo la que presenta un comportamiento casi similar en todos los días de la semana.

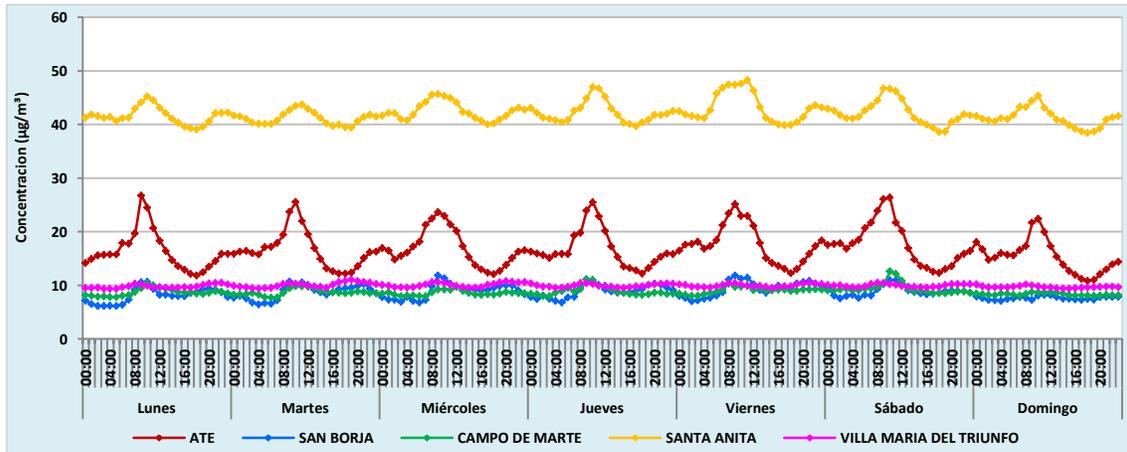


Figura 10. Evolución horaria del SO₂ en los días de la semana

3.2.2. Evolución diaria del SO₂ en los días de la semana

En la **Figura 19**, se aprecian los promedios diarios de la concentración del SO₂ para cada día de la semana. Como en el caso de la evolución horaria, las más altas concentraciones se observan en las estaciones de Santa Anita y Ate, seguidas de Villa María del Triunfo, Campo de Marte y San Borja.

Se observa, en general, que se alcanzan las mayores concentraciones durante el viernes y las menores durante el domingo, siendo esta diferencia más marcada en la estación de Ate. Asimismo, la estación de Villa María del Triunfo presenta un comportamiento casi constante durante toda la semana. Este tipo de comportamiento registrado en las estaciones muestra que la principal fuente asociada a este contaminante es el parque automotor.

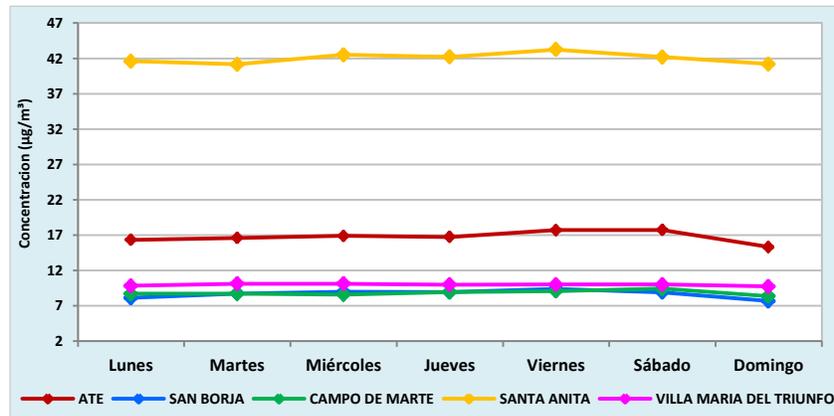


Figura 19. Evolución diaria del SO₂ en los días de la semana

3.2.3. Evolución diaria del SO₂ en la estación de Ate

En la **Figura 20**, se muestra el comportamiento de la concentración media diaria del SO₂ en la estación de Ate a lo largo del año 2013. Oscila entre un mínimo de 6.6 µg/m³ el 31 de enero y un máximo de 45.4 µg/m³ el 16 de febrero; se nota que los valores más elevados se presentan durante los meses de febrero a abril. Sin embargo, no se superó el ECA de 80 µg/m³ (línea roja en la **Figura 21**), vigente hasta el 31 de diciembre del 2013.

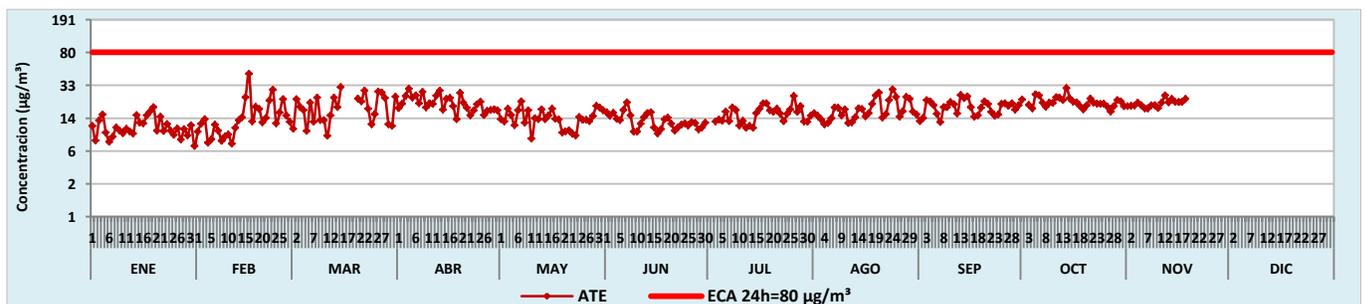


Figura 11. Evolución diaria del SO₂ en la estación de Ate

3.2.4. Evolución diaria del SO₂ en la estación de San Borja

En el caso de la estación de San Borja, tal como se indica en la **Figura 21**, los valores de la concentración diaria no superaron el ECA para el SO₂ (80 µg/m³) y fluctuaron entre 3.2 µg/m³ el 3 y 4 de julio y 15.4 µg/m³ el 15 de marzo; se notaron mayores concentraciones durante los meses cálidos con respecto a los meses fríos.

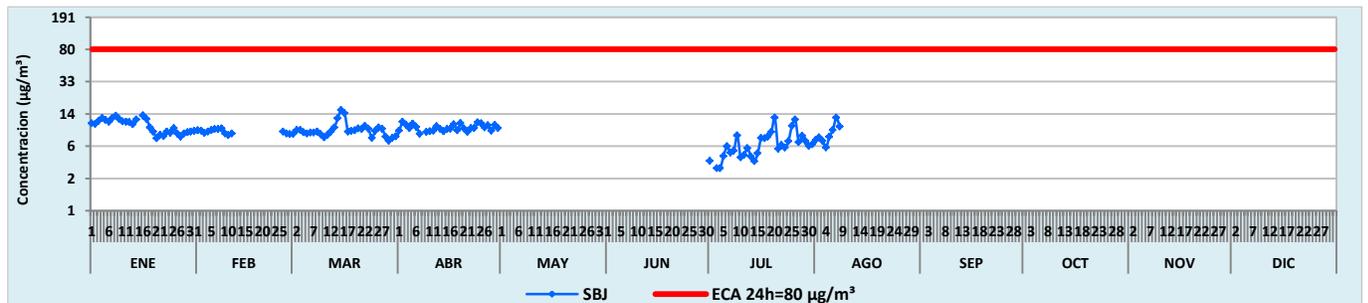


Figura 12. Evolución diaria del SO₂ en la estación de San Borja

3.2.5. Evolución diaria del SO₂ en la estación de Jesús María (Campo de Marte)

En la **Figura 22**, se pueden observar los registros disponibles en la Estación Campo de Marte correspondiente al periodo desde febrero hasta mediados de abril. En dicha estación, ubicada en el distrito de Jesús María, la concentración de SO₂ presentó valores promedio diarios que variaron entre un mínimo de 7.2 µg/m³ el 29 de marzo y un máximo de 14.4 µg/m³ el 16 del mismo mes. Ningún promedio diario registrado rebasó el límite de 80 µg/m³.

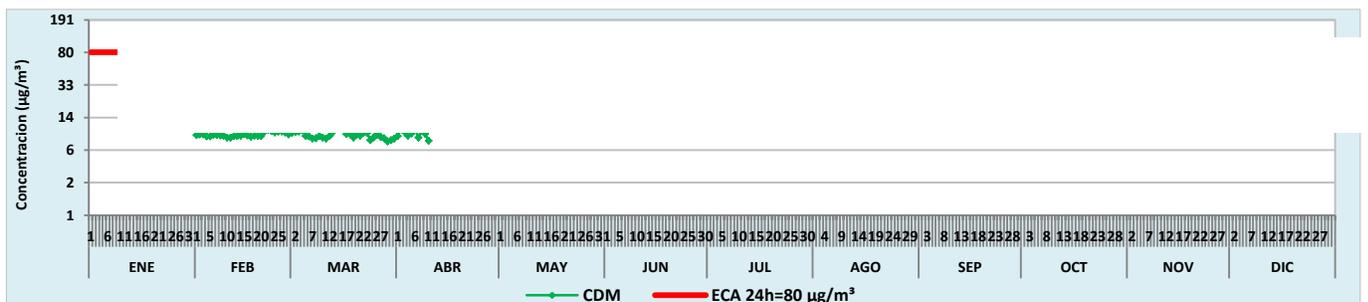


Figura 13. Evolución diaria del SO₂ en la estación de Jesús María

3.2.6. Evolución diaria de SO₂ en la estación de Santa Anita

En la **Figura 23**, se puede apreciar que la concentración promedio diaria de la estación de Santa Anita osciló entre 35.7 µg/m³ (1 y 5 de febrero) y 57.3 µg/m³ (1 de julio). Además, se observa un progresivo incremento de la concentración a mediados del año que luego desciende levemente a fines de noviembre, en todo momento por debajo del ECA.

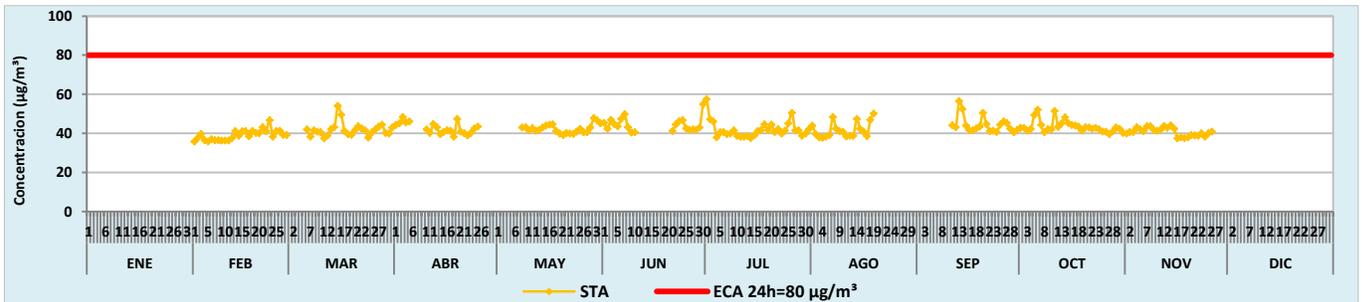


Figura 14. Evolución diaria del SO₂ en la estación de Santa Anita

3.2.7. Evolución diaria de SO₂ en la estación de Villa María del Triunfo

Tal como se muestra en la **Figura 24**, la estación de Villa María del Triunfo presenta valores de concentración diaria de SO₂ que varían entre un mínimo de 8.9 µg/m³ el 23 de marzo y un máximo de 12.1 µg/m³ el 20 de febrero. También se puede apreciar que ninguno de los valores sobrepasó el límite de 80 µg/m³.

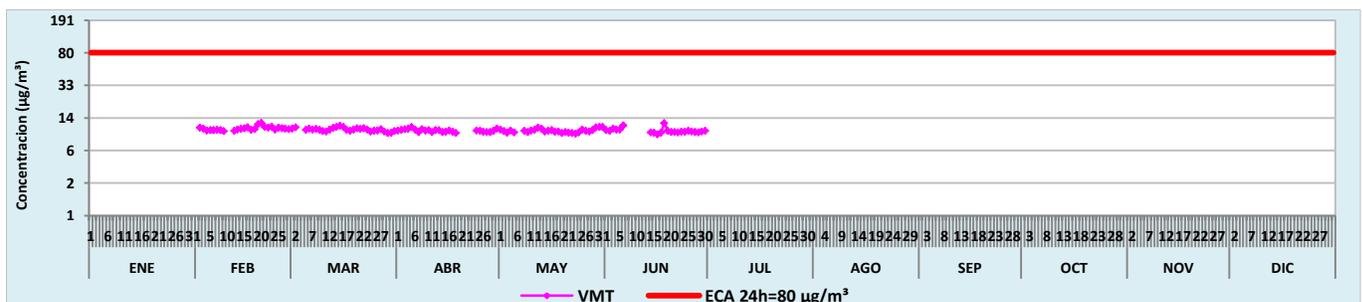


Figura 15. Evolución diaria del SO₂ en la estación de Villa María del Triunfo

3.2.8. Evolución mensual del SO₂ por estaciones de calidad del aire

El comportamiento mensual del SO₂ se muestra en la **Figura 25**. Se puede observar que la estación de Santa Anita presenta las concentraciones mensuales más altas (entre 39.0 y 44.3 µg/m³), seguida de la estación de Ate (entre 11.0 y 21.4 µg/m³), que registra mayor variabilidad a lo largo del año, ambas con los valores más bajos a inicios del año. Esto se debe a que enero y febrero coinciden con el periodo de vacaciones estudiantiles, por lo que el tráfico vehicular decrece durante esos meses. Las estaciones de San Borja, Campo de Marte y Villa María del Triunfo presentaron concentraciones por debajo de 11 µg/m³.

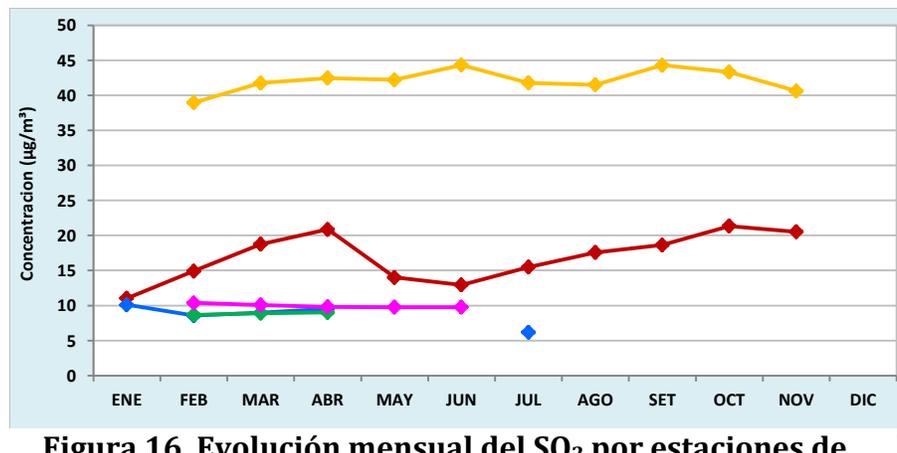


Figura 16. Evolución mensual del SO₂ por estaciones de calidad del aire



3.3. Dióxido de nitrógeno (NO₂)

3.3.1. Evolución horaria del NO₂ en los días de la semana

En la **Figura 26**, se muestra la evolución horaria de las concentraciones de NO₂ en los días de la semana para el año 2013, registrada en las estaciones de calidad del aire ubicadas en los distritos de Ate, Jesús María (Campo de Marte) y Villa María del Triunfo.

Las estaciones de Ate y Villa María del Triunfo registraron las mayores concentraciones horarias de NO₂ en comparación con la estación de Jesús María (Campo de Marte), debido a la gran influencia del parque vehicular que presentan dichos distritos.

En horas de la madrugada (00:00 hasta las 05:00 horas), las concentraciones máximas en los distritos de Ate y Jesús María (Campo de Marte) alcanzaron 35.4 µg/m³ y 23.5 µg/m³, respectivamente; en cambio, el distrito de Villa María del Triunfo presentó 21.2 µg/m³.

En horas de la mañana (06:00 hasta las 12:00 horas), las concentraciones máximas en los distritos de Ate y Villa María del Triunfo fueron de 65.9 µg/m³ y 32.5 µg/m³, respectivamente; en cambio, en el distrito de Jesús María (Campo de Marte) su concentración máxima llegó a 28.2 µg/m³.

En horas de la tarde (13:00 hasta las 18:00 horas), las concentraciones máximas en los distritos de Ate y Villa María del Triunfo fueron de 56.9 µg/m³ y 24.3 µg/m³, respectivamente; en cambio, en el distrito de Jesús María (Campo de Marte) su concentración máxima llegó a 23.8 µg/m³.

En horas de la noche (19:00 hasta las 23:00 horas), las concentraciones máximas en los distritos de Ate y Jesús María (Campo de Marte) fueron de 44 µg/m³ y 27.5 µg/m³, respectivamente; en cambio, en el distrito de Villa María del Triunfo su concentración máxima llegó a 27.1 µg/m³.

Las horas picos de concentraciones máximas alcanzadas durante las madrugadas fueron las 00:00 horas; en las mañanas fueron entre las 09:00 a 11:00 horas; en las tardes fueron a las 13:00 horas y en algunas ocasiones a las 18:00 horas, mientras que en las noches fueron entre las 19:00 a 21:00 horas.

En zonas urbanas, la presencia de los óxidos de nitrógeno se debe a la emisión de los vehículos motorizados que utilizan principalmente diésel, carbón, petróleo o gas natural, que al reaccionar en la atmósfera genera uno de los compuestos más nocivos para la salud humana: el dióxido de nitrógeno. Es por ello que al observar la Figura 26, las concentraciones de NO₂ de Ate (estación ubicada cerca de la Carretera Central) son más elevadas en comparación con las registradas en Villa María y Jesús María (Campo de Marte).

Las concentraciones máximas estarían asociadas a las horas en que la congestión vehicular es alta, debido al traslado de la población a sus centros de labores o de estudios.

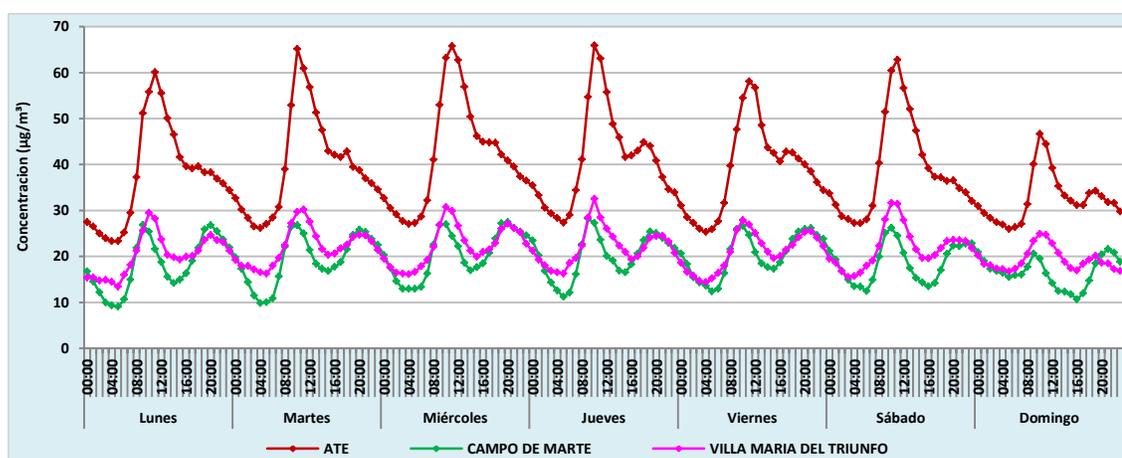


Figura 17. Evolución horaria del NO₂ en los días de la semana

3.3.2. Evolución diaria del NO₂ en los días de la semana

La **Figura 27** muestra el comportamiento de las concentraciones de NO₂ por días de la semana del año 2013 con las características siguientes por estación:

- La estación de Ate presentó las mayores concentraciones de NO₂, que variaron de 32.6 µg/m³ (domingo) a 42 µg/m³ (miércoles).
- La estación de Villa María del Triunfo presentó concentraciones de NO₂, que variaron de 19.3 µg/m³ (domingo) a 22.2 µg/m³ (miércoles).
- La estación de Jesús María (Campo de Marte) reportó concentraciones más bajas de NO₂, que variaron de 16.7 µg/m³ (domingo) a 20.4 µg/m³ (miércoles).

En todas las estaciones se reportan concentraciones de NO₂ de manera casi constante de lunes a sábado con una clara reducción de las concentraciones el día domingo, lo cual se atribuye a la reducción del tránsito vehicular por ser un día no laborable para la mayoría de entidades públicas y privadas. La reducción es evidente en las tres estaciones.

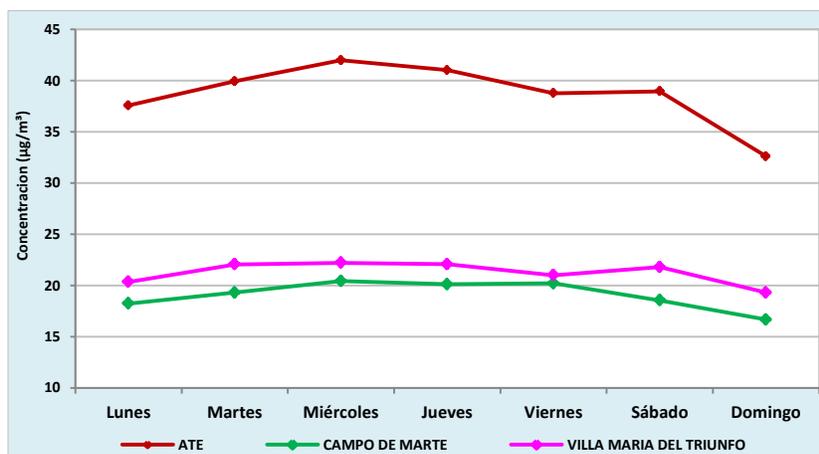


Figura 18. Evolución diaria del NO₂ en los días de la semana

3.3.3. Evolución horaria del NO₂ en la Estación Ate

La **Figura 28** muestra la evolución horaria del NO₂ en la estación de Ate mediante el diagrama de cajas (boxplot), donde la línea central representa el cuartil 2 (Q2 o mediana),

la base inferior el cuartil 1 (Q1) y la base superior el cuartil 3 (Q3); la caja representa la amplitud del intercuartil que contiene el 50% de las concentraciones de NO₂, los bigotes, es decir, las líneas superiores e inferiores, indican los valores extremos y los puntos representan los datos atípicos (outliers).

En la estación de Ate, las concentraciones máximas horarias del NO₂ alcanzaron los 214.89 µg/m³ y 205.82 µg/m³ en los meses de mayo y junio, respectivamente, lo que supera lo establecido en el ECA horario (200 µg/m³). Las concentraciones mínimas se presentaron de noviembre y diciembre con 0.16 µg/m³ y 2.83 µg/m³, respectivamente.

Durante los primeros meses del año (febrero a mayo), las concentraciones aumentaron gradualmente con rangos intercuartiles (Q3-Q1) que fluctuaron de 19.12 µg/m³ a 30.99 µg/m³ y presentaron simetría en febrero y marzo, pero mayor dispersión de sus valores en mayo. Sus medianas se incrementaron desde 31.62 µg/m³ hasta 47.99 µg/m³.

En el periodo de junio a diciembre las concentraciones disminuyeron progresivamente con rangos intercuartiles que fluctuaron de 29.13 µg/m³ a 14.09 µg/m³ y presentaron mayor dispersión de sus valores en noviembre. Sus Q2 también disminuyeron desde 47.67 µg/m³ hasta 18.51 µg/m³.

Respecto a los datos atípicos, estos fueron muy marcados desde febrero hasta junio y podrían representar acontecimientos extraordinarios que incrementaron la concentración del NO₂.

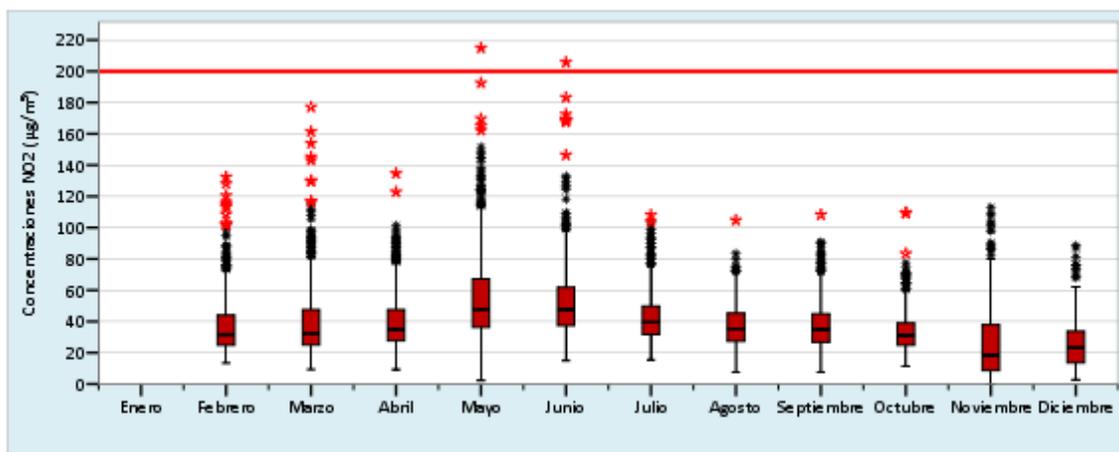


Figura 19. Evolución horaria del NO₂ en la Estación Ate

3.3.4. Evolución horaria del NO₂ en la Estación Jesús María (Campo de Marte)

La **Figura 29** muestra la evolución horaria del NO₂ en la estación de Jesús María (Campo de Marte) mediante el diagrama de cajas. Las concentraciones máximas horarias del NO₂ llegaron a 76.86 µg/m³ y 75.05 µg/m³ en mayo y junio, respectivamente y no superaron el ECA. Las concentraciones mínimas se presentaron en julio y agosto con 0.13 µg/m³ y 0.53 µg/m³, respectivamente.

Durante el primer semestre del año, las concentraciones aumentaron gradualmente, con rangos intercuartiles que fluctuaron de 6.98 µg/m³ a 13.78 µg/m³ y presentaron simetría en febrero y marzo, pero mayor dispersión de sus valores en mayo. En el primer semestre, sus medianas se incrementaron desde 13.49 µg/m³ hasta los 23.14 µg/m³ y similar tendencia expresó la media.

En el segundo semestre, las concentraciones disminuyeron progresivamente con rangos intercuartiles que fluctuaron de 11.93 µg/m³ a 6.91 µg/m³; sin embargo, en diciembre su mediana se incrementó a 25.90 µg/m³.

Los datos atípicos se presentaron a lo largo del año y podrían representar acontecimientos extraordinarios que incrementaron la concentración del dióxido de nitrógeno.

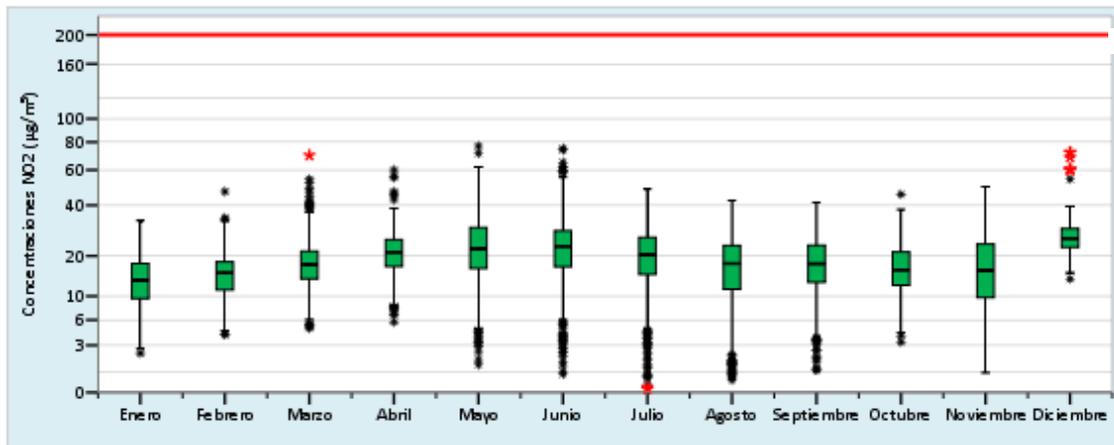


Figura 29. Evolución horaria del NO₂ en la Estación de Jesús María

3.3.5. Evolución horaria del NO₂ en la estación Villa María del Triunfo

La **Figura 30** muestra la evolución horaria del NO₂ en la estación de Villa María del Triunfo mediante el diagrama de cajas. Las concentraciones máximas horarias del NO₂ llegaron a 116.44 µg/m³ y 107.83 µg/m³ en mayo y junio, respectivamente; sin embargo, no superaron el ECA. Las concentraciones mínimas se presentaron en abril y mayo con 2.72 µg/m³ y 2.54 µg/m³, respectivamente.

De enero a mayo, las concentraciones aumentaron gradualmente con rangos intercuartiles que fluctuaron de 7.64 µg/m³ a 20.59 µg/m³ y presentaron mayor dispersión de sus valores en mayo. Sus medianas se incrementaron desde 13.90 µg/m³ hasta 23.23 µg/m³. Similar tendencia expresó la media.

A partir de junio a diciembre, las concentraciones disminuyeron progresivamente con rangos intercuartiles que fluctuaron de 14.19 µg/m³ a 8.49 µg/m³, con mayor dispersión en junio y menor en octubre. Las tendencias entre la media y la mediana fueron similares.

Los datos atípicos se presentaron a lo largo del año y podrían representar acontecimientos extraordinarios que incrementaron la concentración del NO₂.

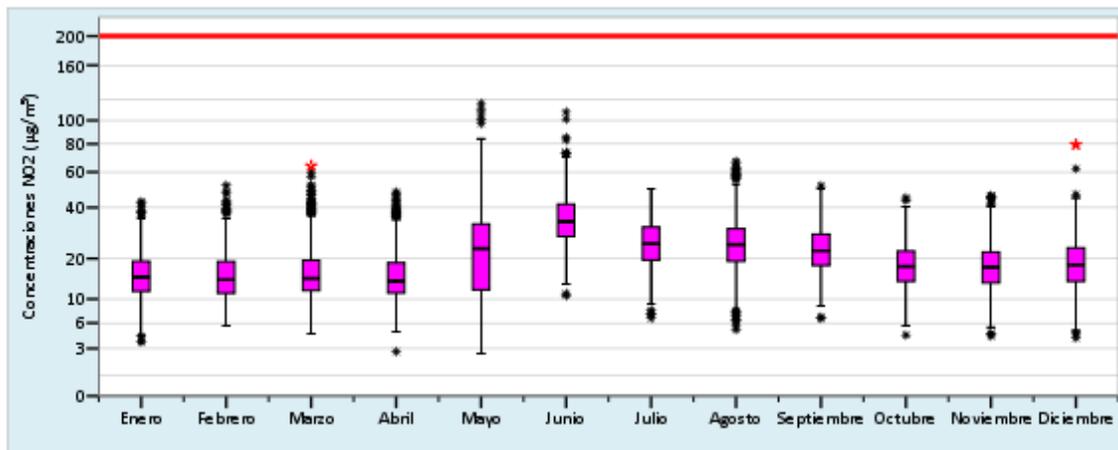


Figura 20. Evolución horaria del NO₂ en la estación Villa María del Triunfo

3.3.6. Evolución mensual del NO₂ por estaciones de calidad del aire

La **Figura 31** muestra la evolución mensual del NO₂ registrada en las estaciones de Ate, Villa María del Triunfo y Campo de Marte. Las mayores concentraciones mensuales se presentaron en la estación de Ate comparado con las estaciones de Villa María del Triunfo y Jesús María (Campo de Marte), que muestran tendencias similares.

Ate presentó la mayor concentración mensual en mayo con 55.2 µg/m³. Villa María del Triunfo y Jesús María (Campo de Marte) presentaron mayores concentraciones en junio con 35.4 µg/m³ y 23.8 µg/m³, respectivamente.

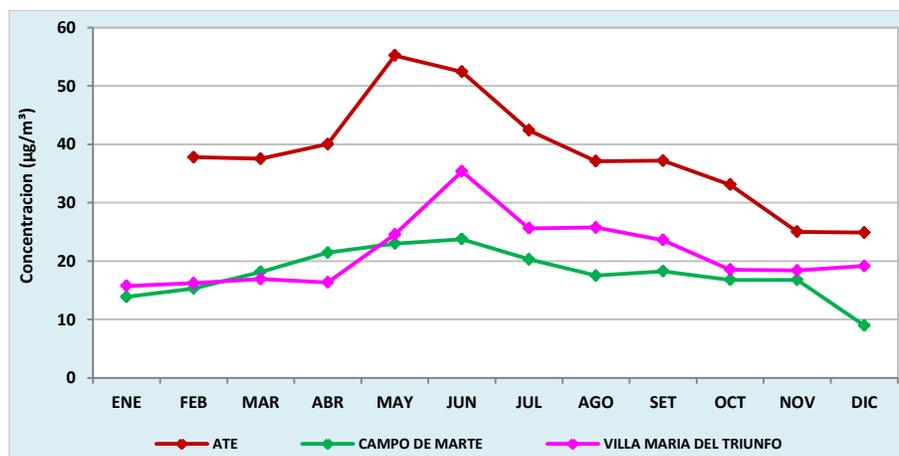


Figura 21. Evolución mensual del NO₂ por estaciones de calidad del aire

3.3.7. Evolución anual de NO₂ por estaciones de calidad del aire

La **Figura 32** presenta la evolución anual del dióxido de nitrógeno desde el 2011 al 2013 y, como se puede observar, en ningún caso supera el estándar nacional de calidad ambiental del aire que establece el valor anual de 100 µg/m³.

La estación de Ate presentó un descenso de sus concentraciones anuales de NO₂ del 2012 al 2013 que correspondió a 18%; similar situación ocurrió en Jesús María (Campo de Marte) que disminuyó en 10%; caso contrario sucedió en Villa María del Triunfo que en dichos años tuvo un incremento de la concentración anual de 17%.

Las estaciones de San Borja y Santa Anita no registraron datos en el año 2013, debido a problemas técnicos; sin embargo, presentaron descenso en las concentraciones del 2011 al 2012 de 11 % y 7%, respectivamente.

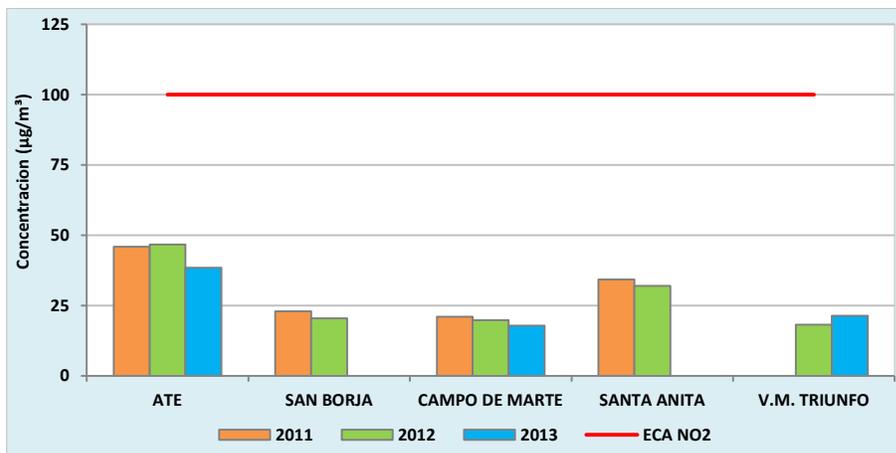


Figura 22. Evolución anual del NO₂ por estaciones de calidad del aire

3.4. Ozono (O₃)

3.4.1. Evolución horaria del O₃ en los días de la semana

En la **Figura 33**, se puede observar el comportamiento promedio horario en los días de la semana del 2013 del ozono troposférico en cada una de las estaciones de monitoreo de la calidad del aire (Ate, San Borja, Campo de Marte, Santa Anita, Villa María del Triunfo). Los valores máximos se registraron durante el intervalo de las 13:00 y 14:00 horas, periodo que coincide con los valores elevados de la radiación solar. En las estaciones de Villa María del Triunfo, San Borja y Campo de Marte también se apreciaron valores máximos nocturnos en el periodo de la 01:00 a 07:00 horas.

Asimismo, se puede apreciar que el pico diurno de la concentración de ozono es más pronunciado en las estaciones de Ate, Villa María del Triunfo, Santa Anita y Campo de Marte comparado con la estación de San Borja. También se observó la más baja concentración de ozono en la estación de Santa Anita en el periodo de 19:00 a 07:00 horas. En términos generales, en cada una de las estaciones se aprecia una tendencia creciente del O₃, con valores mínimos el lunes y máximos el domingo.

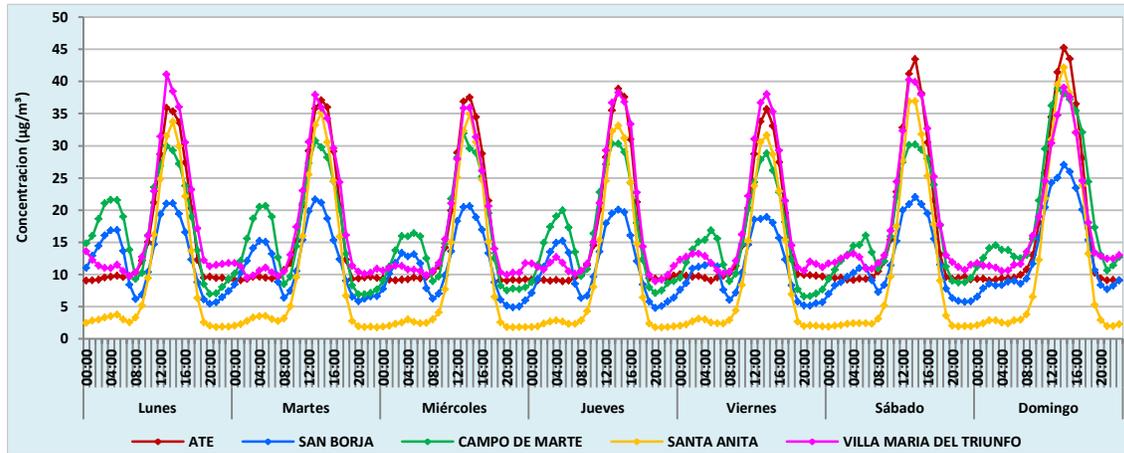


Figura 23. Evolución horaria del O₃ en los días de la semana

3.4.2. Evolución diaria del O₃ en los días de la semana

En la **Figura 34**, se aprecia el promedio semanal diario de la concentración de O₃. Las más altas concentraciones de ozono se registraron en las estaciones de Villa María del Triunfo, Campo de Marte y Ate, mientras que Santa Anita y San Borja presentaron los niveles más bajos de concentración de ozono.

En general, los mayores valores de concentraciones de O₃ se presentaron el día domingo y las menores, el viernes, siendo esta diferencia más marcada en la estación de Campo de Marte. La estación de Ate presentó un comportamiento casi constante de lunes a viernes.

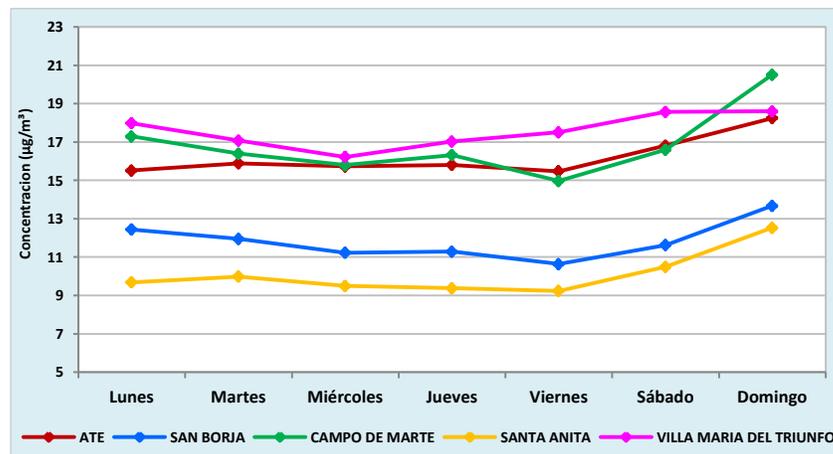


Figura 24. Evolución diaria del O₃ en los días de la semana

3.4.3. Evolución de medias móviles de 8 horas de ozono en la Estación Ate

A continuación, se presentan mediante diagramas de cajas las concentraciones medias móviles (promedio de 8 horas) de ozono superficial de cada estación de monitoreo de la calidad del aire y cada mes del año 2013.

Este diagrama representa de manera gráfica la distribución de los datos y permite la comparación simultánea entre varios grupos de datos. Los bordes inferior y superior de la caja representan el percentil 25 y 75, respectivamente, donde a una mayor separación entre estos le corresponde una mayor variabilidad en el 50 % central de los datos. La línea que divide la caja es la mediana (valor central). Las líneas verticales (bigotes) se extienden desde los percentiles 25 y 75 hacia los valores extremos inferior y superior, respectivamente. Los valores atípicos están representados por asteriscos.

La **Figura 35** muestra que el O₃ superficial en la estación de Ate presenta una mediana que oscila entre 10.4 µg/m³ y 14.9 µg/m³ (valores de julio y enero, respectivamente) y alcanza una máxima concentración de 57.9 µg/m³ en abril. El ECA para O₃, que equivale a 120 µg/m³ (línea roja en el gráfico), no fue superado en todo el 2013, siendo la concentración máxima registrada el 48 % de su valor. Se observa además una mayor dispersión en el 50 % central de los datos durante los meses cálidos en comparación con los meses de invierno.

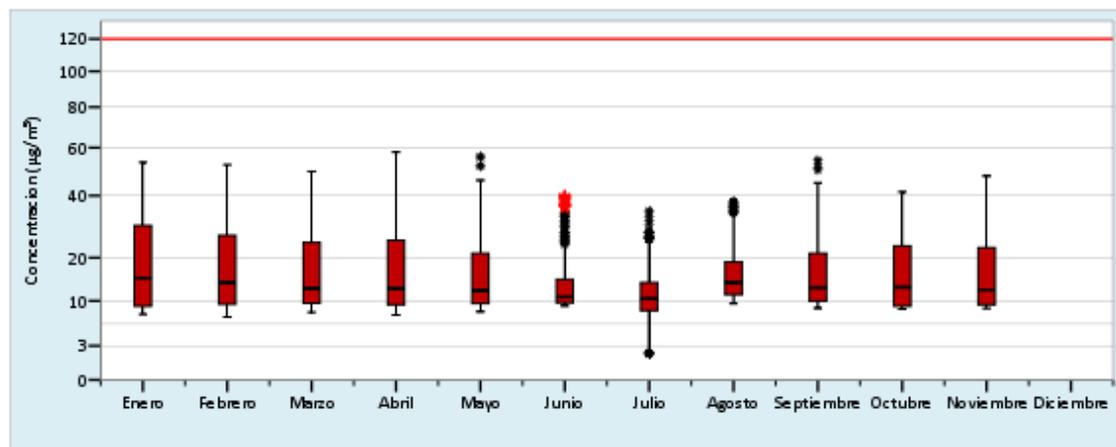


Figura 255. Evolución de medias móviles de 8 horas de ozono en la Estación Ate

Evolución de medias móviles de 8 horas de ozono en la Estación San

3.4.4. Borja

Como se observa en la **Figura 36**, la concentración mediana de O_3 varía entre $8.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (abril) y $15.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (enero), con un valor atípico máximo de $50.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en setiembre (42 % del ECA). La dispersión del 50 % central de los datos presentó poca variación a lo largo del año.

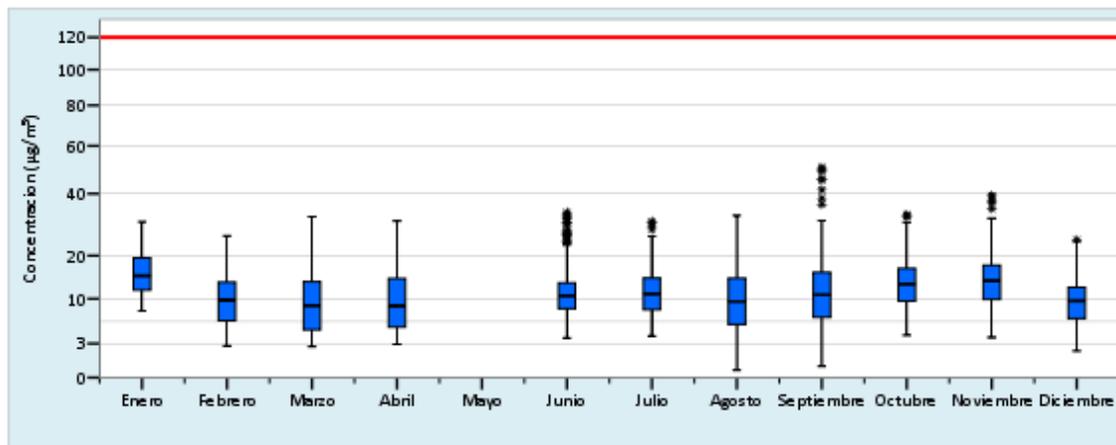


Figura 26. Evolución de medias móviles de 8 horas de ozono en la Estación San Borja

3.4.5. Evolución de medias móviles de 8 horas de ozono en la Estación Jesús María (Campo de Marte)

En la estación de Jesús María (Campo de Marte), las concentraciones medianas de O_3 estuvieron dentro del rango que va de $11.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a $23.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, valores registrados en los meses de febrero y octubre, respectivamente, como se muestra en la **Figura 37**. La variabilidad del 50 % central de los datos fue relativamente constante durante todos los meses y llegó a alcanzar un valor extremo máximo de $80.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ durante el mes de setiembre, que representa el 67 % del ECA.

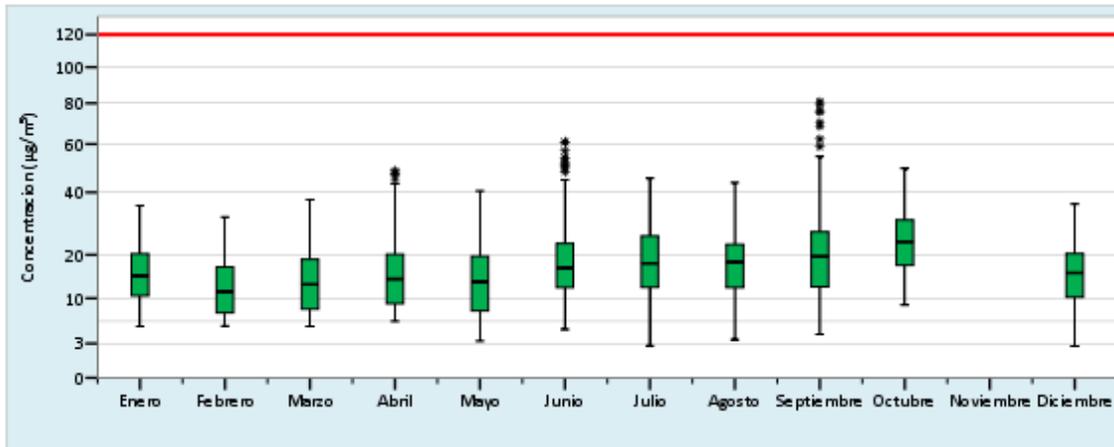


Figura 27. Evolución de medias móviles de 8 horas de ozono en la Estación Jesús María

3.4.6. Evolución de medias móviles de 8 horas de ozono en la Estación Santa Anita

La distribución de las concentraciones de O_3 en la estación de Santa Anita se muestra en la **Figura 38**. El valor central o mediana oscila entre $3.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (junio) y $9.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (enero) y alcanza un valor máximo de $53.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en marzo, por lo que todas las concentraciones se encontraron por debajo del ECA ($120 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Se observa además que la variabilidad en el 50 % central de los datos disminuye durante los meses de invierno.

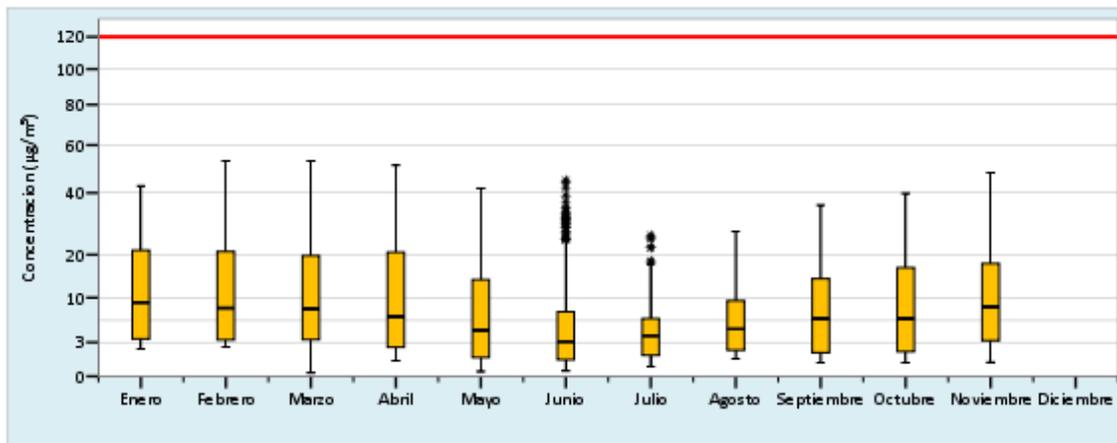


Figura 28. Evolución de medias móviles de 8 horas de ozono en la Estación Santa Anita

3.4.7. Evolución de medias móviles de 8 horas de ozono en la Estación Villa María del Triunfo

En la **Figura 39**, se ilustra el comportamiento del O₃ en la estación de Villa María del Triunfo con concentraciones medianas que varían entre 10.3 µg/m³ y 20.6 µg/m³, valores que corresponden, respectivamente, a los meses de mayo y diciembre. Durante el ciclo anual 2013, se alcanzaron concentraciones máximas de 53.4 µg/m³ y 50.9 µg/m³ en los meses de enero y diciembre, respectivamente. Todas las concentraciones registradas estuvieron por debajo del ECA del ozono (120 µg/m³ media móvil de 8 horas).

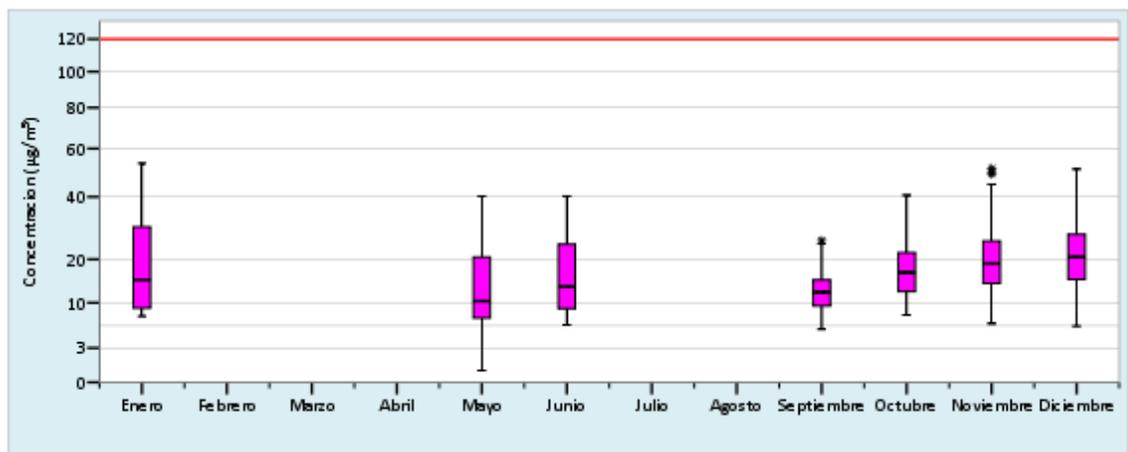


Figura 39. Evolución de medias móviles de 8 horas de ozono en la Estación Villa María del Triunfo

3.4.8. Evolución mensual del O₃ por estaciones de calidad del aire

El comportamiento mensual del ozono se muestra en la **Figura 40**, donde se observa que la estación de Ate presentó las concentraciones mensuales más altas durante el periodo de enero a mayo (entre 16.0 µg/m³ y 19.9 µg/m³) con tendencia decreciente hasta julio, después se nota una tendencia de aumento del ozono hasta noviembre, cuando se completa una onda. La estación de Campo de Marte, con una tendencia creciente, registra los valores más altos durante el intervalo de junio a noviembre (entre 18.6 µg/m³ y 24.3 µg/m³). La estación de Santa Anita presentó concentraciones de ozono más bajas en julio, 5.4 µg/m³.

En general, se observa que las estaciones de Santa Anita y Ate presentan una onda estacional con máximos de concentración de ozono en el periodo de octubre, noviembre,

diciembre, enero y febrero (los tres últimos meses con la mayor intensidad de radiación solar) y valores mínimos en el intervalo de junio, julio y agosto, que se caracteriza por la presencia de nubosidad baja y ausencia de nubes medias y altas.

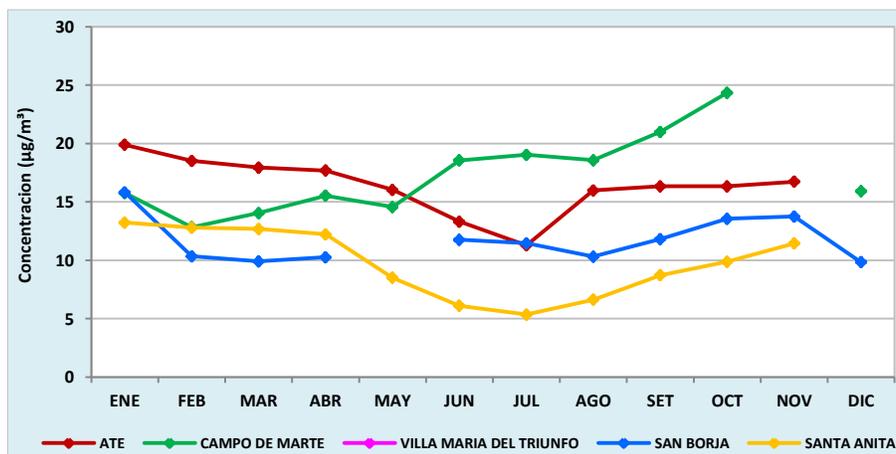


Figura 29. Evolución mensual del O₃ por estaciones de calidad del aire

4. CONDICIONES METEOROLÓGICAS

4.1. Capa de mezcla

La **Figura 41** muestra la variación promedio mensual de la altura de la capa de mezcla medida en el año 2013 con el sistema de radiosondeo en el Aeropuerto Jorge Chávez. La altura de la capa de mezcla es la porción del aire influenciada por la superficie terrestre. En la figura se aprecia que el valor mínimo de la altura de la capa de mezcla es de 187 metros en marzo, debido a la disminución de la intensidad del anticiclón del Pacífico sur. En los meses de junio, julio, agosto, setiembre, octubre, noviembre, diciembre y enero la altura de la capa de mezcla varía de 649 a 841 metros.

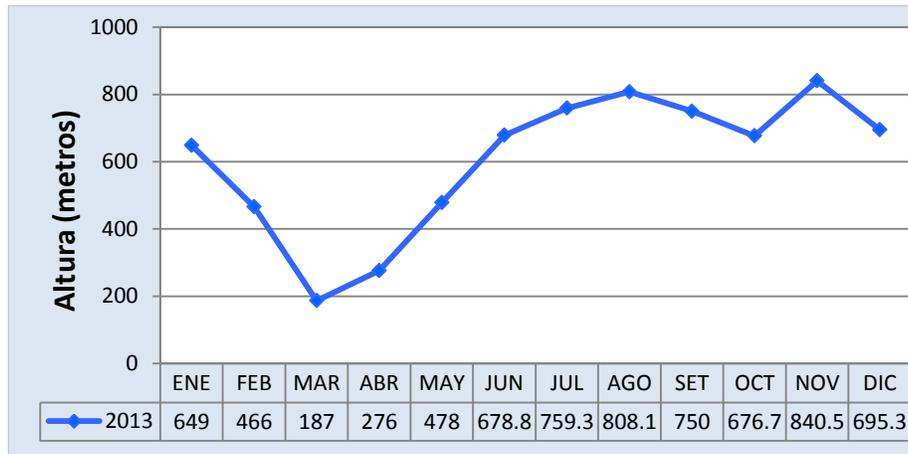


Figura 301. Variación promedio mensual de la capa de mezcla en el año 2013

La **Figura 42** muestra el análisis temporal del comportamiento de la altura de la capa de mezcla para el periodo de marzo a febrero; se aprecia que dicha variabilidad se ajusta a una expresión cuadrática, cuya mayor inflexión se presenta durante octubre y la mínima en marzo.

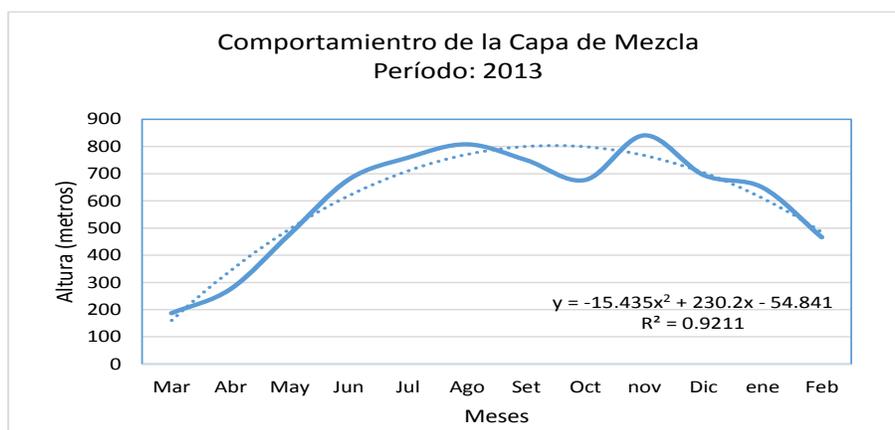


Figura 31. Ajuste matemático a la distribución de la capa de mezcla

4.2. Temperatura

La **Figura 43** muestra la variación mensual de la temperatura del aire en seis estaciones meteorológicas: Antonio Raimondi, Las Palmas, Aeropuerto Jorge Chávez, Villa María del Triunfo, Campo de Marte y Alexander Von Humboldt. Se nota baja variabilidad de la temperatura del aire en todos los meses del año 2013, producto del calor específico del agua del mar, ya que la ciudad de Lima está frente al mar del océano Pacífico. En las seis estaciones meteorológicas, la temperatura del aire no excede los 24 °C (en el mes de febrero en la estación de Alexander Von Humboldt) y no es menor de 13.7 °C (en la estación de Villa María del Triunfo en el mes de agosto).

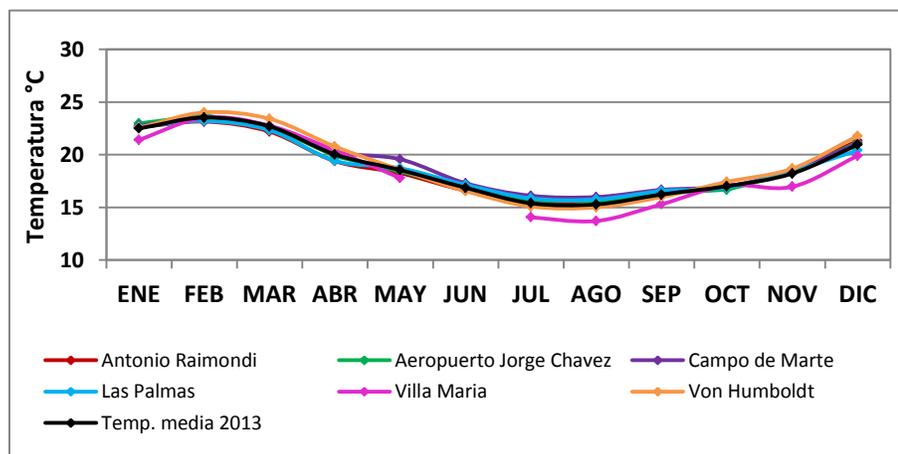


Figura 32. Variación mensual de la temperatura del aire en el 2013

Al realizar un análisis entre estas variables y la altura de la capa de mezcla, el comportamiento entre ellas se representa por dos tipos de expresiones matemáticas: uno comprendido entre marzo y octubre (color azul) y el otro de noviembre a febrero (color anaranjado), como se aprecia en la **Figura 44**.

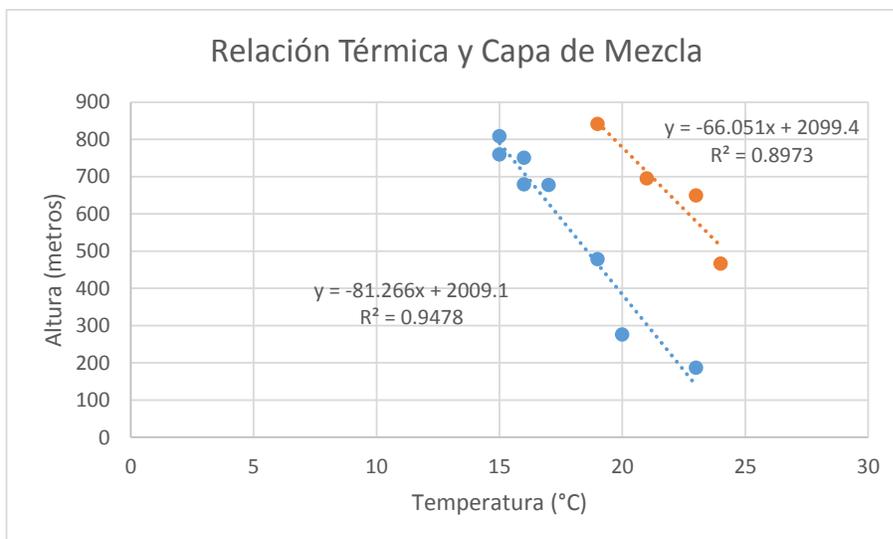


Figura 33. Interrelación térmica y la altura de la capa de mezcla

4.3. Humedad relativa

La **Figura 45** muestra la variación promedio mensual y la media de humedad relativa en seis estaciones meteorológicas: Antonio Raimondi, Las Palmas, Aeropuerto Jorge Chávez, Villa María del Triunfo, Campo de Marte, Alexander Von Humboldt. Se nota alta humedad relativa con un promedio anual de 80%. La variación media mensual de la humedad relativa no excede 95 % en el mes de agosto, en la estación de Villa María del Triunfo, y no es menor de 69 % en el mes de febrero, en la estación Alexander Von Humboldt, por estar más alejada del mar.

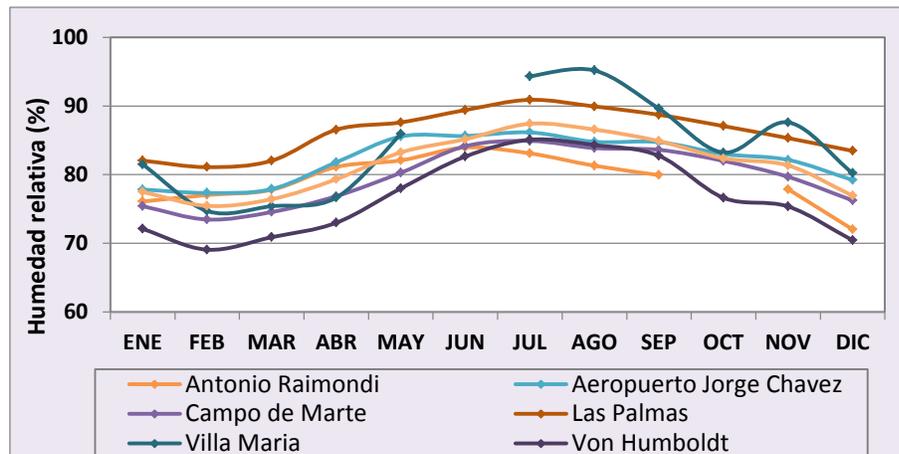


Figura 34. Variación promedio mensual de la humedad relativa en el año 2013

Las relaciones encontradas entre la altura de la capa de mezcla y la humedad relativa se aprecian en la **Figura 46**, donde el ajuste a la distribución de los valores está representado por dos tipos de ecuaciones.

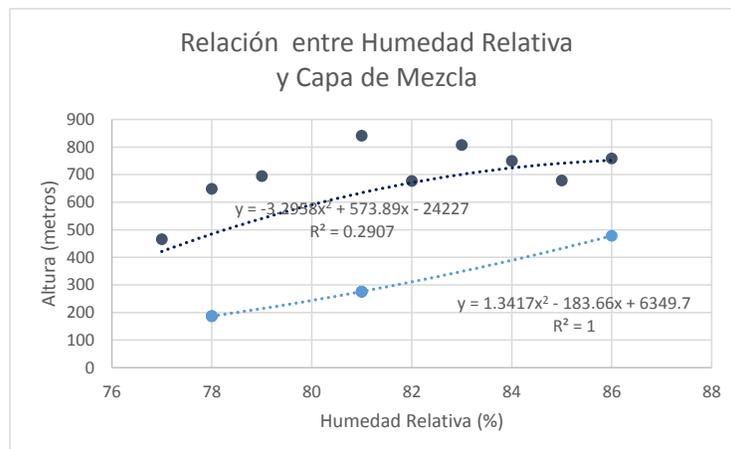


Figura 35. Interrelación entre la humedad relativa y la altura de la capa de mezcla

4.4. Precipitación

La **Figura 47** muestra las variaciones mensuales de la precipitación en tres estaciones meteorológicas: Aeropuerto Jorge Chávez, Campo de Marte y Alexander Von Humboldt, que registraron valores durante el 2013. Se aprecia que las mayores precipitaciones se producen durante el periodo de junio a setiembre con valores que alcanzan hasta 6.8 mm/mes (en agosto en la estación Alexander Von Humboldt), mientras que en enero y octubre se presentan aportes mínimos con escasa precipitación (0 mm/mes).

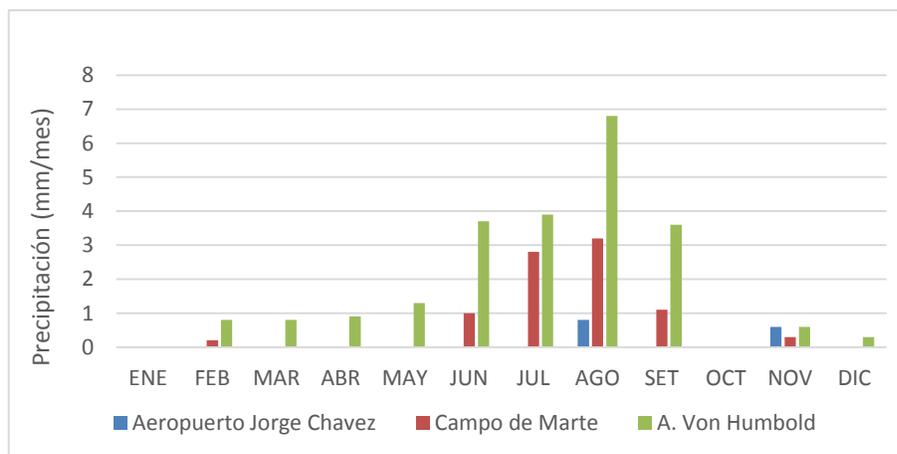


Figura 36. Evolución mensual del comportamiento de la precipitación en el año 2013

4.5. Vientos

Las variaciones mensuales de la velocidad del viento fueron registradas en seis estaciones meteorológicas (Antonio Raimondi, Las Palmas, Aeropuerto Jorge Chávez, Villa María del Triunfo, Campo de Marte, Alexander Von Humboldt). Se observa una variabilidad estacional con valores que fluctúan entre 0,6 m/s y 4,5 m/s; se registra un valor mínimo de 0.6 m/s durante marzo en la estación de Campo de Marte y un máximo de 4.5 m/s durante diciembre en la estación Aeropuerto Jorge Chávez (**Figura 48**).

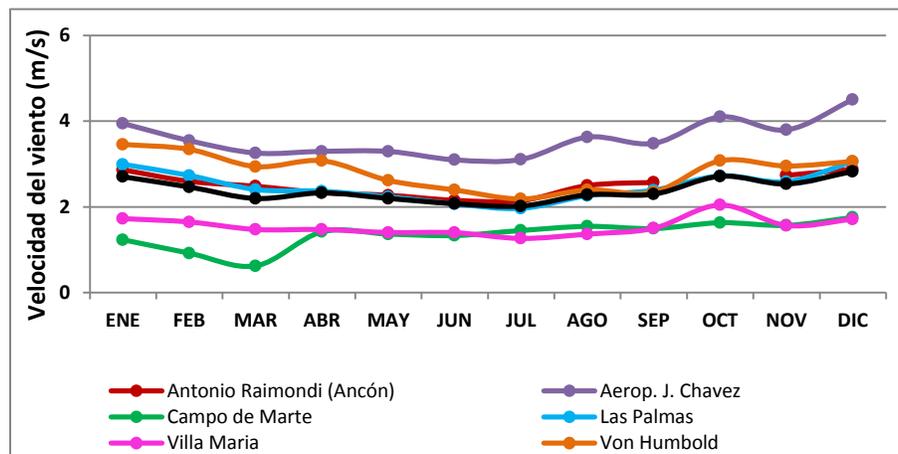


Figura 37. Evolución mensual del comportamiento de la velocidad del viento en el año 2013



5. CONCLUSIONES

- La Red de Calidad del Aire del SENAMHI presentó un buen desempeño anual, porque sus porcentajes de captura de datos fueron altos, siendo en Ate de 95 % y en Villa María del Triunfo de 91 %.
- Los datos válidos estuvieron por encima del 75 % en todos los contaminantes, a excepción del dióxido de nitrógeno, que no fue registrado en San Borja ni en Santa Anita, debido a problemas técnicos y falta de repuestos. Las concentraciones máximas horarias de PM_{10} durante las mañanas y las tardes estarían asociadas a las horas en que la congestión vehicular es alta, debido al traslado de la población a sus centros de labores o de estudios que generalmente exigen horarios de ingreso entre las 7:00 y 8:00 horas, lo que provoca que el PM_{10} , cuyo tiempo de residencia en la atmósfera es de minutos a horas se acumule en la atmósfera hasta alcanzar su máxima concentración en las horas antes indicadas (9:00 y 10:00 horas) para luego disminuir, debido a los procesos de deposición seca o húmeda. Lo mismo estaría ocurriendo en las noches y madrugadas, considerando que en dichos periodos la atmósfera es estable, con vientos de calma a muy débiles que propiciarían la suspensión de las partículas en el aire en dichas horas.
- En todas las estaciones se reportan concentraciones de PM_{10} que se mantienen altas durante los días laborables y descienden durante los fines de semana, lo cual se atribuye a la reducción de las actividades de la población por ser días no laborables.
- Ate superó el estándar nacional de calidad ambiental del aire (ECA) para PM_{10} en el 2013 por 56 días de los 345 días de monitoreo; la norma establece que no se debe exceder el ECA en 3 días durante un año.
- Santa Anita superó en 21 días el estándar de calidad para PM_{10} de los 225 días monitoreados y Villa María del Triunfo en 110 días de los 320 monitoreados, mientras que San Borja y Jesús María (Campo de Marte) no superaron el ECA diario de PM_{10} .
- En términos del estado de la calidad del aire, el distrito de Ate se mantuvo en moderado en la mayor parte del año, solo durante la temporada fría se registraron días con estado de calidad bueno, sobre todo en julio y agosto, debido a la presencia de ligeras lloviznas o garúas.
- San Borja presentó estados de calidad bueno y moderado. Los meses de febrero a abril tuvieron más días con estado moderado y en los meses de enero y diciembre hubo la mejor calidad del aire del año.



- En Jesús María (Campo de Marte), se presentaron condiciones de estado bueno en todos los días monitoreados de enero y diciembre, así como en la mayoría de los días de febrero, marzo, octubre y noviembre, mientras que en los meses restantes (de abril a agosto) predominaron los días de estado moderado.
- En Santa Anita, el estado predominante es moderado; pocos días en los meses de junio a agosto hubo un estado bueno.
- Villa María del Triunfo presentó las condiciones más adversas con predominio de estados malo y muy malo en el periodo de enero a mayo, mientras que en los meses siguientes hubo predominio del estado moderado con ligera presencia de días con estado bueno.
- Las concentraciones de PM_{10} más elevadas se presentaron durante los meses de verano (febrero-marzo) y otoño (abril-mayo), lo cual se explica porque durante esos meses se presentaron los valores más bajos de la altura de inversión. Por otro lado, en los meses de invierno (julio-agosto), se observó un descenso considerable en las concentraciones, debido a la presencia de precipitaciones (lloviznas o garúas).
- Las estaciones de Ate, Santa Anita y Villa María del Triunfo superaron el ECA anual ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$).
- Los niveles de SO_2 están relacionados estrechamente con la cantidad de flujo vehicular, al presentar concentraciones horarias que se incrementan por efecto de las horas punta. Se observó mayor variabilidad horaria en las estaciones de Santa Anita y Ate en comparación con las de San Borja, Campo de Marte y Villa María del Triunfo.
- Las concentraciones de SO_2 por días de la semana mostraron que estas tienen un comportamiento similar de lunes a jueves, alcanzan sus mayores valores los días viernes y sus mínimos los domingos, lo que demuestra una vez más que la principal fuente de este gas contaminante proviene del parque automotor.
- En cuanto a la evolución diaria del SO_2 a lo largo del año 2013, se observó que en ninguna de las estaciones se superó el ECA de $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (vigente hasta el 31 de diciembre del 2013). Fue la estación de Santa Anita donde se alcanzó la mayor concentración (casi 3 veces lo registrado en Ate, alrededor de 4 veces lo registrado en Villa María del Triunfo y aproximadamente 5 veces lo registrado en Campo de Marte y San Borja). En Ate y San Borja se observó un aumento de las concentraciones en la temporada cálida y un descenso en la fría.
- La evolución mensual de los niveles de SO_2 muestra que la estación de Santa Anita supera ampliamente a las demás estaciones y, junto con la de Ate, presenta la mayor variabilidad a lo largo del año, con una disminución en la temporada fría y



otra a inicios de año durante el periodo de vacaciones estudiantiles, cuando el flujo vehicular decrece.

- Ate y Villa María del Triunfo registraron las mayores concentraciones horarias de NO_2 en comparación con Jesús María (Campo de Marte), debido a la gran influencia del parque vehicular que presentan dichos distritos.
- En los días laborables, todas las estaciones reportaron concentraciones de NO_2 de manera casi constante y una clara reducción de las concentraciones el día domingo.
- Las concentraciones horarias de dióxido de nitrógeno no superaron lo establecido en el ECA ($\text{NO}_2 = 200 \mu\text{g}/\text{m}^3$) en ninguna de las estaciones; sin embargo, las concentraciones máximas horarias se presentaron durante los meses de febrero a mayo, lo cual se asocia a la baja altura de la capa de mezcla durante ese periodo.
- Ate presentó la mayor concentración mensual en mayo con $55.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Villa María del Triunfo y Jesús María (Campo de Marte) presentaron mayores concentraciones en junio con $35.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $23.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente.
- En ningún caso las concentraciones anuales de NO_2 superaron el ECA anual de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$. La estación de Ate presentó un descenso de sus concentraciones anuales de NO_2 del 2012 al 2013, que correspondió a 18%. Similar situación ocurrió en Jesús María (Campo de Marte) que disminuyó en 10%; caso contrario sucedió en Villa María del Triunfo que en dichos años tuvo incrementó de la concentración anual de 17%.
- El comportamiento horario (media móvil) de O_3 superficial mostró que en ninguna de las estaciones se sobrepasó el ECA para O_3 ($120 \mu\text{g}/\text{m}^3$), siendo la estación de Jesús María la que presentó el nivel más alto, equivalente al 67 % del ECA. Sin embargo, los valores centrales de O_3 (mediana) oscilaron entre 3.1 y $23.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En las estaciones de Santa Anita y Villa María fue más notoria la diferencia de las concentraciones entre la temporada fría y cálida (aumenta en la estación cálida por la mayor incidencia de radiación solar).



6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Instituto Nacional de Estadística e Informática del Perú (2013). Estado de la población peruana 2013. Lima: INEI. Disponible en:
http://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1095/libro.pdf

Notario, A., I. Bravo, et al. (2013). "Variability of oxidants ($O_x=O_3+NO_2$), and preliminary study on ambient levels of ultrafine particles and VOCs in an important ecological area in Spain". *Atmospheric Research* 128(0): 35-45.

Mavroidis, I. and M. Ilia (2012). "Trends of NO_x , NO_2 and O_3 concentrations at three different types of air quality monitoring stations in Athens, Greece". *Atmospheric Environment* 63(0): 135-147.