

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE CIENCIAS



**“DETERMINACIÓN DEL NIVEL DE CONTAMINACIÓN
ATMOSFÉRICA POR PM_{2,5} EN EL CAMPUS DE LA UNIVERSIDAD
NACIONAL AGRARIA LA MOLINA”**

Presentado por:

Federico Augusto Murriel Gonzales

Tesis para Optar el Título Profesional de:

INGENIERO AMBIENTAL

Lima – Perú

2017

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

LA MOLINA

FACULTAD DE CIENCIAS

**“DETERMINACIÓN DEL NIVEL DE CONTAMINACIÓN
ATMOSFÉRICA POR PM_{2,5} EN EL CAMPUS DE LA UNIVERSIDAD
NACIONAL AGRARIA LA MOLINA ”**

Presentado por:

Federico Augusto Murriel Gonzales

Tesis para Optar el Título Profesional de:

INGENIERO AMBIENTAL

Sustentado y Aprobado por el siguiente jurado:

Mg.Sc. Juan Carlos Chang Chang Fun
PRESIDENTE

Mg.Sc. Armando Aramayo Bazzetti
MIEMBRO

Ing. Franklin Unsihuay Tovar
MIEMBRO

Ph.D. Sergio Pacsi Valdivia
ASESOR

COPIA DE ACTA DE SUSTENTACIÓN

(Reemplazar esta hoja por la copia del acta de sustentación)

DEDICATORIA

A mis padres Milagritos y Federico, que por ellos estoy donde estoy.

*A mis hermanos Rodrigo, Francia y Carlos, quienes son mi principal motivo para crecer
como persona.*

A mi tío Martín Armas quien fue, es y será mi ejemplo de superación.

A Romina, Janeth, Mayumi, Gabriela y Erika, por demostrar que la amistad verdadera existe.

AGRADECIMIENTO

A mi compañero Cesar Llanos que, con sus consejos y apoyo incondicional, me ayudó a superar los obstáculos que se presentaron al realizar la presente investigación.

Al profesor Sergio Pacsi Valdivia, por depositar su confianza en mí al convertirse en mi asesor de tesis, y por apoyarme y orientarme constantemente durante el desarrollo de la presente investigación.

A Edgar Giraldo que, sin su valiosa ayuda, confianza y conocimientos, jamás hubiese podido ejecutar la fase de campo y, por ende, esta investigación no se hubiese llevado a cabo.

A la profesora Deyanira, Ing. Josué Alata, Sr. Max, Sr. Bastidas, Sr. Vílchez, mi amigo David Velásquez y demás personas que, con pequeñas acciones, causaron un gran impacto positivo en la presente investigación.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	i
I. INTRODUCCIÓN	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA	5
2.1. CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA.....	5
2.2. MATERIAL PARTICULADO	5
2.2.1. DEFINICIÓN	5
2.2.2. CLASIFICACIÓN DEL MATERIAL PARTICULADO	6
2.3. MATERIAL PARTICULADO CON DIÁMETRO AERODINÁMICO MENOR A 2,5 MICRAS (PM _{2,5}).....	7
2.3.1. CARACTERÍSTICAS.....	7
2.3.1.1. COMPOSICIÓN.....	7
2.3.1.2. MECANISMOS DE ORIGEN	8
2.3.1.3. PERMANENCIA EN LA ATMÓSFERA.....	13
2.3.2. EFECTOS E IMPORTANCIA.....	14
2.3.3. CONTROL Y VIGILANCIA ACTUAL DE LA CALIDAD DEL AIRE RESPECTO AL PM _{2,5}	16
2.3.3.1. ESTÁNDARES NACIONALES E INTERNACIONALES DE CALIDAD DEL AIRE PARA PM _{2,5}	16
2.3.3.2. ÍNDICE NACIONAL DE LA CALIDAD DEL AIRE (INCA).....	18
2.3.4. VARIACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DEL PM _{2,5}	22

2.3.4.1.	FACTORES QUE AFECTAN LA CONCENTRACIÓN DEL PM _{2,5} EN EL AIRE.....	22
2.3.4.2.	VARIACIÓN TEMPORAL Y ESPACIAL DE LA CONCENTRACIÓN DEL PM _{2,5}	23
2.3.5.	MÉTODO DE MUESTREO Y DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE PM _{2,5}	24
2.4.	PRUEBAS ESTADÍSTICAS EN MINITAB 17	25
III.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	32
3.1.	MATERIALES Y EQUIPOS.....	32
3.2.	METODOLOGÍA	33
3.2.1.	MEDICIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE PM _{2,5} EN EL AIRE	33
3.2.1.1.	ESTABLECIMIENTO DE LA RED DE MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AIRE.	33
3.2.1.1.1.	DEFINICIÓN DEL PARÁMETRO A MONITOREAR	33
3.2.1.1.2.	ÁREA DE ESTUDIO.....	33
3.2.1.1.3.	PUNTOS DE MONITOREO	36
3.2.1.2.	DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DEL PM _{2,5} EN EL AIRE	40
3.2.1.2.1.	PROGRAMA DE MONITOREO.....	40
3.2.1.2.2.	MÉTODO DE MUESTREO.....	41
3.2.2.	DETERMINACIÓN DE LA VARIACIÓN TEMPORAL DE LA CONCENTRACIÓN DE PM _{2,5} EN EL AIRE.....	44
3.2.2.1.	VARIACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE PM _{2,5} POR CICLO DE MONITOREO	44
3.2.2.2.	VARIACIÓN DIARIA DE LA CONCENTRACIÓN DE PM _{2,5}	46
3.2.2.3.	COMPORTAMIENTO DE LA CONCENTRACIÓN DE PM _{2,5} EN RELACIÓN A LOS DÍAS DE LA SEMANA.....	48

3.2.3.	DETERMINACIÓN DE LA VARIACIÓN ESPACIAL DE LA CONCENTRACIÓN DE PM _{2,5} EN EL AIRE.....	49
3.2.3.1.	COMPORTAMIENTO DE LA CONCENTRACIÓN DE PM _{2,5} EN RELACIÓN A LOS PUNTOS DE MONITOREO.....	49
3.2.3.2.	DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA CONCENTRACIÓN DE PM _{2,5} EN EL CAMPUS DE LA UNALM.....	50
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	51
4.1.	MEDICIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE PM _{2,5} EN EL AIRE.....	51
4.2.	DETERMINACIÓN DE LA VARIACIÓN TEMPORAL DE LA CONCENTRACIÓN DE PM _{2,5} EN EL AIRE.....	53
4.2.1.	VARIACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE PM _{2,5} POR CICLO DE MONITOREO	53
4.2.2.	VARIACIÓN DIARIA DE LA CONCENTRACIÓN DE PM _{2,5}	66
4.2.3.	COMPORTAMIENTO DE LA CONCENTRACIÓN DE PM _{2,5} EN RELACIÓN A LOS DÍAS DE LA SEMANA.....	75
4.3.	DETERMINACIÓN DE LA VARIACIÓN ESPACIAL DE LA CONCENTRACIÓN DE PM _{2,5} EN EL AIRE.....	81
4.3.1.	COMPORTAMIENTO DE LA CONCENTRACIÓN DE PM _{2,5} EN RELACIÓN A LOS PUNTOS DE MONITOREO.....	81
4.3.2.	DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA CONCENTRACIÓN DE PM _{2,5} EN EL CAMPUS DE LA UNALM.....	86
V.	CONCLUSIONES.....	90
VI.	RECOMENDACIONES.....	93
VII.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	94
VIII.	ANEXOS	103

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Estándar Nacional de Calidad Ambiental del Aire para PM _{2,5}	17
Tabla 2. Valor Guía o Referencial para la concentración de PM _{2,5} en el Aire, según el Organismo Mundial de la Salud.	18
Tabla 3. Rangos de valores del INCA asociados a sus colores correspondientes y su respectiva clasificación de la calidad del aire.....	20
Tabla 4. Efectos negativos sobre la salud y declaraciones preventivas según clasificación de la calidad del aire con respecto al PM _{2,5}	21
Tabla 5. Pruebas estadísticas comparativas, de correlación y otras que pueden ser desarrolladas por MINITAB 17.....	27
Tabla 6. Referencias geográficas de los cinco puntos de monitoreo.....	39
Tabla 7. Detalle de procedimientos para la toma de muestras.	42
Tabla 8. Concentraciones de PM _{2,5} (µg/m ³) por punto de monitoreo, agrupadas por estación del año en que se obtuvieron.	54
Tabla 9. Valores p resultantes de la aplicación de las pruebas estadísticas homogeneidad de varianzas, t en dos muestras y U de Mann Whitney.....	56
Tabla 10. Coeficientes de correlación de Spearman (r) y valor p respectivo resultantes de la aplicación de la prueba correlación de Spearman entre las concentraciones de PM _{2,5} y los valores de las variables meteorológicas temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y radiación solar.	61

Tabla 11. Porcentaje excedido del Estándar Nacional de Calidad Ambiental y Valor Guía de la Organización Mundial de la Salud por día monitoreado, promedio por punto de monitoreo y promedio general.....	70
Tabla 12. Concentraciones de PM _{2,5} (µg/m ³) obtenidas durante el periodo de monitoreo agrupadas según el día de la semana en que fueron obtenidas.	75
Tabla 13. Resultado de la prueba ANOVA de un solo factor aplicado a los datos de concentración de PM _{2,5} obtenidos en los días lunes, martes, miércoles, jueves, viernes, sábado y domingo, durante el periodo de monitoreo.....	78
Tabla 14. Concentraciones de PM _{2,5} (µg/m ³) obtenidas durante el periodo de monitoreo agrupadas según el punto de monitoreo en que fueron obtenidas.....	81
Tabla 15. Resultado de la prueba Kruskal Wallis aplicado a los datos de concentración de PM _{2,5} obtenidos en los puntos de monitoreo P1, P2, P3, P4 y P5, durante el periodo de monitoreo.....	83

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mecanismo de formación de aerosoles orgánicos (partículas) componentes del $PM_{2,5}$.	11
Figura 2. Esquema de la deposición del $PM_{2,5}$.	14
Figura 3. Región del sistema respiratorio alcanzado por material particulado de acuerdo a su tamaño.	15
Figura 4. Representación gráfica de una relación monótona.	30
Figura 5. Representación gráfica de una relación monótona lineal positiva y negativa.	30
Figura 6. Área de la UNALM y su campus.	34
Figura 7. Zonas colindantes o límites de la UNALM.	36
Figura 8. Ubicación de los cinco puntos de monitoreo dentro del campus de la UNALM.	39
Figura 9. Concentraciones de $PM_{2,5}$ en el aire ambiental de la UNALM durante el periodo de monitoreo, identificadas por código de muestra.	52
Figura 10. Resultado de la prueba estadística Anderson Darling aplicada a los grupos de datos de concentración de $PM_{2,5}$ obtenidos en invierno y primavera en los puntos de monitoreo P1, P2 y P3.	54
Figura 11. Resultado de la prueba estadística Anderson Darling aplicada a los grupos de datos de concentración de $PM_{2,5}$ obtenidos en invierno y primavera en los puntos de monitoreo P4 y P5.	55

Figura 12. Resultado de la prueba estadística Anderson Darling utilizada sobre el grupo de concentraciones de $PM_{2,5}$, grupo de valores de temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y radiación solar, obtenidos durante el periodo de monitoreo	60
Figura 13. Tendencia de la temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, radiación solar y concentración de $PM_{2,5}$, durante el periodo de monitoreo.....	62
Figura 14. Representación gráfica de la ubicación del campus de la UNALM respecto a los cerros del distrito La Molina y de la dirección predominante del viento durante el periodo de monitoreo.....	64
Figura 15. Concentraciones de $PM_{2,5}$ en el aire ambiental de la UNALM durante el periodo de monitoreo (04 julio – 19 noviembre).....	67
Figura 16. Distribución de los valores de concentración de $PM_{2,5}$ obtenidos durante el periodo de monitoreo (04 julio – 19 noviembre) representada en un gráfico de cajas	68
Figura 17. Valores diarios del Índice Nacional de Calidad del Aire para $PM_{2,5}$ de las concentraciones obtenidas durante el periodo de monitoreo (04 julio – 19 de noviembre).....	72
Figura 18. Distribución de los valores del Índice Nacional de Calidad del Aire para $PM_{2,5}$ obtenidos durante el periodo de monitoreo (04 julio – 19 noviembre) representada en un gráfico de cajas.....	73
Figura 19. Resultado de prueba estadística Anderson Darling aplicada a los datos de concentración de $PM_{2,5}$ obtenidos en los días lunes, martes, miércoles, jueves, viernes, sábado y domingo durante el periodo de monitoreo.....	76

Figura 20. Resultado de prueba estadística homogeneidad de varianzas aplicado a los datos de concentración de $PM_{2,5}$ obtenidos en los días lunes, martes, miércoles, jueves, viernes, sábado y domingo, durante el periodo de monitoreo.....	77
Figura 21. Tendencia por punto de monitoreo de las concentraciones de $PM_{2,5}$ según el día de la semana en que fueron obtenidas, durante el primer y segundo ciclo de monitoreo	79
Figura 22. Resultado de prueba estadística Anderson Darling aplicada a los grupos datos de concentración de $PM_{2,5}$ obtenidos en los puntos de monitoreo P1, P2, P3, P4 y P5, durante el periodo de monitoreo	82
Figura 23. Distribución de los valores las concentraciones de $PM_{2,5}$ obtenidos en cada punto de monitoreo, representado en un gráfico de cajas.....	84
Figura 24. Isolneas de concentración de $PM_{2,5}$ en el campus de la UNALM durante el periodo de monitoreo.....	87
Figura 25. Isolneas de concentración de $PM_{2,5}$ durante el invierno en el campus de la UNALM	88
Figura 26. Isolneas de concentración de $PM_{2,5}$ durante la primavera en el campus de la UNALM.....	89

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1: Niveles de estados de alerta nacionales de contaminantes del aire (Decreto Supremo N° 012-2005-SA).	103
ANEXO 2: Frecuencia y cronograma de monitoreo	104
ANEXO 3: Cálculos estadísticos realizados en Minitab 17 para la sección “Diferencia o igualdad de los grupos de concentración de PM _{2,5} obtenidas en invierno y primavera”.	105
ANEXO 4: Cálculos estadísticos realizados en Minitab 17 para la sección “Determinación de la correlación entre valores de concentración de PM _{2,5} y valores de variables meteorológicas temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y radiación solar”.	112
ANEXO 5: Cálculos estadísticos realizados en Minitab 17 para la sección “Comportamiento de la concentración de PM _{2,5} en relación a los días de la semana”	114
ANEXO 6: Cálculos estadísticos realizados en Minitab 17 para la sección “Comportamiento de la concentración de PM _{2,5} en relación a los puntos de monitoreo”.	117
ANEXO 7: Álbum fotográfico	121
ANEXO 8: Certificado de calibración del equipo muestreador marca Partisol.	126
ANEXO 9: Esquema de flujo del funcionamiento del equipo muestreador marca Partisol.	127

RESUMEN

En la presente investigación se determinó la concentración de $PM_{2,5}$ y su variación temporal y espacial en el campus de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM) durante el periodo julio – noviembre del año 2016, así como el Índice Nacional de Calidad del Aire (INCA) y la relación de éste contaminante con las variables meteorológicas. Para ello, se trabajó con muestras de $PM_{2,5}$ colectadas con un muestreador de bajo volumen marca Partisol modelo 2000-H, en cinco puntos de monitoreo ubicados dentro del campus. Las muestras se colectaron de forma inter diaria, obteniéndose catorce muestras por punto de monitoreo y setenta en total. Los resultados mostraron que las concentraciones de $PM_{2,5}$ en el campus superan el Estándar Nacional de Calidad Ambiental del Aire y el Valor Guía de la Organización Mundial de la Salud; siendo $45.24 \mu\text{g}/\text{m}^3$ la concentración promedio de $PM_{2,5}$ en el campus. Además, se encontró que las concentraciones de éste contaminante oscilan en el rango $36.89 - 42.92 \mu\text{g}/\text{m}^3$ lo cual determina valores del INCA, que van de 148 a 200, asociados con una calidad del aire calificada como *mala*. Por otra parte, se encontró que las concentraciones de $PM_{2,5}$, a nivel de campus, variaron durante el cambio estacional (de invierno a primavera), obteniéndose las concentraciones más altas durante el periodo de invierno, el cual se asocia con valores bajos de temperatura, velocidad del viento y radiación solar (variables meteorológicas que guardan una relación negativa con la concentración de $PM_{2,5}$) y valores altos de humedad relativa (variable meteorológica que guarda una relación positiva con la concentración de $PM_{2,5}$). Asimismo, se encontró que las concentraciones de $PM_{2,5}$ son similares estadísticamente en todos los días de la semana. Por otro lado, en todos los puntos de monitoreo las concentraciones de $PM_{2,5}$ fueron similares estadísticamente, lo cual sugiere que a nivel de campus la distribución de la concentración de $PM_{2,5}$ es relativamente homogénea.

Palabras clave: $PM_{2,5}$, concentración, variación temporal, variación espacial.

ABSTRACT

The present research determined the concentration of PM_{2,5} and its temporal and spatial variation in the campus of the National Agrarian University La Molina (UNALM), as well as the Air Quality National Index (INCA) and the relation of this pollutant with the meteorological variables. To do that were used PM_{2,5} samples collected with a low volume sampler Partisol model 2000-H during the period July – November of the year 2016 in five monitoring sites located inside the campus. The samples were collected inter daily obtaining fourteen samples per monitoring site and seventy as a whole. The results showed that the PM_{2,5} concentrations in the campus overcome the National Standard for Environmental Air Quality and the World Health Organization Guideline Values, being 45.24 µg/m³ the average PM_{2,5} concentration in the campus. Furthermore, it was found that the concentrations of this pollutant oscillate in the rank 36.89 – 42.92 µg/m³ which determine INCA values that range from 148 to 200 associated with an air quality classified as *bad*. On the other hand, it was found that the PM_{2,5} concentrations in the campus varied during the seasonal change (from winter to spring) obtaining the highest concentrations during winter, which is associated to low values of temperature, wind velocity and solar radiation (meteorological variables that have a negative relation with the PM_{2,5} concentration) and high values of relative humidity (meteorological variable that has a positive relation with the PM_{2,5} concentration). Likewise, PM_{2,5} concentrations were statically similar in all weekdays. In the other hand, in all the monitoring sites the PM_{2,5} concentrations were statistically similar which suggest that at a campus level the distribution of the PM_{2,5} concentration is relatively homogeneous.

Key words: PM_{2,5}, concentration, temporal variability, spatial variability.

I. INTRODUCCIÓN

La contaminación del aire es un problema global (OMS, 2006). Conforme se ha ido investigando en el tema, se ha demostrado que los efectos de la contaminación del aire tienen impactos globales y regionales. Episodios de sequías prologadas, inundaciones derivadas de lluvias intensas y nevadas severas, permiten evidenciar que las alteraciones que está sufriendo el clima en el planeta se deben a la presencia de contaminantes en la atmósfera (SEMARNAT, 2011). Asimismo, la contaminación atmosférica es vista en Perú y en otros países como un problema local, el cual principalmente se manifiesta en las grandes ciudades. De la gran variedad de contaminantes atmosféricos, el material particulado ha ido adquiriendo importancia paulatinamente con respecto a dos puntos de vista principales, el daño a la salud humana y su contribución al cambio climático (SEMARNAT, 2011).

Querol (2004) y Amdur, citado por Ibañez (2008) mencionan que el material particulado es una mezcla de partículas sólidas, líquidas o una combinación de ambas, compuestas por sustancias orgánicas e inorgánicas, y dicha composición varía de un lugar a otro. Este contaminante varía en tamaño, composición y origen, por lo cual resulta conveniente clasificar las partículas, según sus propiedades aerodinámicas, en partículas gruesas y partículas finas (Korc, citado por Ibañez 2008, Johansson, citado por Silva et al. 2013). Estas últimas incluyen al material particulado con diámetro aerodinámico menor a 2,5 micras, conocido comúnmente como $PM_{2,5}$, el cual se puede originar a partir de fuentes primarias como las emisiones (Gao et al., 2015), así como por otros procesos secundarios que involucran reacciones químicas en la atmósfera entre contaminantes atmosféricos precursores (Finlayson, citado por Massoud et al. 2011; Gao et al., 2015). Asimismo, la concentración de $PM_{2,5}$ en el aire generalmente no es constante entre diferentes puntos ni en diferentes días; esta dinámica de la concentración de $PM_{2,5}$ indica que presenta variación espacial y temporal, generalmente asociadas a condiciones del entorno, como

la topografía, las actividades humanas, y condiciones o variables meteorológicas, como la temperatura, precipitación, humedad, velocidad y dirección del viento (García y Tantaleán, 2008; Van der Wal y Janssen, Giri et al. y Unal et al., citados por Silva et al. 2013).

A nivel mundial se ha reportado que elevadas concentraciones de contaminantes atmosféricos pueden tener efectos adversos sobre la salud y el ambiente. La contaminación del aire puede tener consecuencias graves como la exacerbación de las enfermedades respiratorias y la muerte prematura en personas. Debido al tamaño del $PM_{2.5}$ y su capacidad para ingresar directamente al sistema respiratorio y depositarse en los alveolos pulmonares (región alveolar), éste ha sido asociado con causas de morbilidad y mortalidad (Brunekreef et al., 1995; CAFE Programme, 2004; OMS, 2006; Pope et al., citado por Massoud et al. 2011). Estudios han demostrado una fuerte correlación entre las concentraciones de material particulado fino ($PM_{2.5}$) y problemas respiratorios, determinando que un incremento de las concentraciones de este contaminante puede incrementar el número de ingresos hospitalarios y mortalidad diaria (García y Tantaleán, 2008; Schwartz et al., citado por Silva et al. 2013); asimismo, dichos estudios concluyen que la exposición a elevadas concentraciones de $PM_{2.5}$ puede causar enfermedades pulmonares de obstrucción crónica, reducción de la capacidad funcional del pulmón tanto en niños como en adultos, probabilidad de adquirir cáncer de pulmón y reducción en la expectativa de vida debido a mortalidad cardiopulmanar (Pope III et al, citado por Yepés et al. 2010).

Entre las capitales latinoamericanas, Lima es una de las ciudades con el peor cuadro de contaminación atmosférica, lo cual no solo perjudica la calidad de vida de sus habitantes, sino que le impide seguir ganando atractivo como centro para hacer negocios (Salazar y Townsend, 2009). La dirección de los vientos y la distribución de los cerros hacen que la contaminación afecte principalmente a los distritos limeños localizados en el norte y el este (García y Tantaleán, 2008; Salazar y Townsend, 2009). En los últimos años, las concentraciones de contaminantes atmosféricos, incluido el material particulado fino ($PM_{2.5}$), han superado estándares internacionales de protección pública, lo cual ha motivado a las instituciones públicas a desarrollar políticas de gestión ambiental para contrarrestar y controlar los impactos causados por esta situación con la finalidad de proteger a la salud pública de los efectos adversos (García

y Tantaleán, 2008). Actualmente, el país cuenta con Estándares Nacionales de Calidad Ambiental del Aire y su Reglamento aprobados por Decreto Supremo N° 074-2001-PCM y Decreto Supremo 003-2008-MINAM, siendo este último el que contiene el estándar de calidad ambiental para $PM_{2,5}$ (DIGESA, 2005).

La Universidad Nacional Agraria La Molina, localizada en la zona este de la provincia de Lima, en el distrito de La Molina, es un lugar como muchos otros donde no se han desarrollado estudios para determinar la calidad del aire en relación al contaminante $PM_{2,5}$; por lo tanto se desconoce si la comunidad universitaria está expuesta a elevados niveles de concentración de dicho contaminante que sobrepasen el Estándar Nacional de Calidad Ambiental respectivo y, por ende, si su salud está siendo afectada. Debido a esto, se consideró necesario realizar una investigación acerca de la determinación del nivel de concentración de $PM_{2,5}$ y el análisis de su variación temporal y espacial en el aire del campus de la Universidad Nacional Agraria La Molina, de manera *in situ*, para conocer cómo es la calidad del aire con respecto a éste contaminante, y tener así un indicio de si la salud de la comunidad universitaria está siendo afectada o no.

Es por ello que, como una forma de aporte de información básica, útil para la una futura toma de decisiones, la presente investigación pretende medir la concentración de $PM_{2,5}$ y determinar la variación temporal y espacial de ésta en el aire ambiental del campus de la Universidad Nacional Agraria La Molina. Por otro lado, es necesario aclarar que la presente investigación no pretende identificar o realizar un inventario de las fuentes específicas del $PM_{2,5}$ muestreado, ya que está enfocada a la determinación de los niveles de concentración y su comportamiento en el tiempo y el espacio.

Objetivo General

Determinar la concentración, variación temporal y espacial del material particulado con diámetro aerodinámico menor a 2,5 micras ($PM_{2,5}$) en el aire ambiental del campus de la Universidad Nacional Agraria La Molina, para evaluar la calidad del mismo en relación a Estándares de Calidad nacionales e internacionales, durante el periodo julio – noviembre del año 2016.

Objetivos Específicos

- Medir la concentración de $PM_{2,5}$ en el aire ambiental.

- Determinar la variación temporal de la concentración de $PM_{2,5}$ en el aire ambiental.

- Determinar el Índice Nacional de Calidad del Aire y evaluar el estado de la calidad del aire respecto al $PM_{2,5}$.

- Evaluar la relación entre el $PM_{2,5}$ y las variables meteorológicas.

- Determinar la variación espacial de la concentración de $PM_{2,5}$ en el aire ambiental.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA

La contaminación atmosférica es definida como la presencia en la atmósfera de uno o más contaminantes, o combinaciones de éstos, en cantidades tales y con tal duración que puedan afectar la vida de personas, animales, plantas o la propiedad, interferir con el goce de la vida, y el ejercicio de las actividades (Wark y Warner, 1994). Tales contaminantes pueden ser introducidos a la atmósfera por causas naturales o por la acción del hombre (Inza, 2006). Según normas nacionales e internacionales, se ha denominado a un grupo de especies químicas como contaminantes atmosféricos criterio debido a que estas son utilizadas como criterio para evaluar la calidad del aire (OEFA, 2015). En el Perú son considerados contaminantes criterio el monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x), ozono (O₃), hidrógeno sulfurado (H₂S) y el material particulado (PM) (SENAMHI, 2013).

2.2. MATERIAL PARTICULADO

2.2.1. DEFINICIÓN

El material particulado atmosférico o partículas ambientales, es el conjunto de partículas sólidas, líquidas o una combinación de ambas, que se encuentran en suspensión en la atmósfera (Mészáros, citado por Inza 2006). Estas partículas se caracterizan por variar en tamaño, composición y origen de un lugar a otro (Ibañez 2008). La concentración de material particulado en el aire se expresa en microgramo de partículas por metro cúbico de aire ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) (OEFA, 2015).

2.2.2. CLASIFICACIÓN DEL MATERIAL PARTICULADO

Las partículas se pueden clasificar de muchas maneras usando diferentes criterios. El criterio más común de clasificación es el tamaño de las partículas. Sin embargo, debido a que las partículas tienen una infinidad de formas, no es posible caracterizarlas con una sola magnitud geométrica real, por ello se utiliza el diámetro aerodinámico como un indicador del tamaño de la partícula, el cual es igual al diámetro de una partícula esférica con densidad unitaria que tiene la misma velocidad terminal (velocidad constante que alcanza la partícula debido a la fuerza de arrastre ejercida por el fluido a través del cual se está moviendo) que la partícula considerada bajo condiciones de temperatura, presión y humedad existentes, independientemente de su forma, tamaño o densidad (CAFE Programme, 2004; Ibañez, 2008; SEMARNAT, 2011). Según el tamaño, el material particulado se clasifica de la siguiente forma (Ibañez, 2008; SEMARNAT, 2011).

- **Partículas Totales en Suspensión (PTS):** incluyen partículas con diámetro aerodinámico menores a 50 micras, con capacidad para permanecer suspendidas en el aire. No es buen indicador de exposición relativa a la salud debido a que algunas PTS, gracias a su tamaño, no pueden ingresar al sistema respiratorio humano.

- **PM₁₀:** incluyen a las partículas con diámetro aerodinámico menor a 10 micras. Son consideradas indicadores de exposición relativa a la salud debido a que pueden penetrar el sistema respiratorio y llegar hasta los conductos superiores del pulmón (bronquios). También son denominadas partículas gruesas (partículas con tamaño comprendido entre 10 y 2,5 micras)

- **PM_{2,5}:** incluyen a las partículas con diámetro aerodinámico menor a 2,5 micras. Son consideradas indicadores de exposición relativa a la salud debido a que pueden penetrar en el sistema respiratorio y llegar hasta los conductos más bajos del pulmón (alveolos). También son denominadas partículas finas.

Existen otros criterios más básicos de clasificación del material particulado, como es el origen de estas. Según el origen se distinguen dos clasificaciones del material particulado (SEMARNAT 2011).

- **Partículas Primarias:** incluye aquellas que son emitidas directamente hacia la atmósfera desde diversas fuentes, por ejemplo, a través del humo oscuro emitidos por el tubo de escape de un vehículo motorizado (emisión de PM_{10} y $PM_{2,5}$) o resuspensión de polvo desde una superficie (emisión de PM_{10} y $PM_{2,5}$).
- **Partículas Secundarias:** incluye aquellas que se forman en la atmósfera por medio de reacciones químicas entre materiales o contaminantes gaseosos llamados precursores (dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno, por ejemplo).

2.3. MATERIAL PARTICULADO CON DIÁMETRO AERODINÁMICO MENOR A 2,5 MICRAS ($PM_{2,5}$)

2.3.1. CARACTERÍSTICAS

2.3.1.1. COMPOSICIÓN

El $PM_{2,5}$ se encuentra suspendido en la atmósfera y varía de tamaño, composición y origen de un lugar a otro (Querol et al., 2004; OMS, 2006). Una mezcla de sustancias, con diferentes orígenes y propiedades, que pueden ser sólidas, líquidas o una combinación de ambas componen al $PM_{2,5}$ (Querol et. al., 2004; Yepés et al., 2010), haciendo que éste represente una mezcla compleja de compuestos orgánicos e inorgánicos tales como metales, aniones, hollín y material volátil (Yepés et. al., 2010; Hu et al., 2014; Wang et al., citado por Gao et al. 2015). Ésta composición química diversa depende del tipo de fuente emisora, así como del mecanismo de su formación (SEMARNAT, 2011). Sin embargo, a modo general, la composición típica del $PM_{2,5}$ comprende sulfatos, nitratos, amonio, carbón orgánico o aerosoles orgánicos

(Compuestos Orgánicos Volátiles e Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos), carbón negro (hollín), y metales pesados (Ibañez, 2008; Yepés et al., 2010; Massoud, 2011; SEMARNAT, 2011; Santiago, 2013; Gao, 2015; Tolis et al., 2015)

Ibañez (2008) menciona que en 1987, en el sur de California, las contribuciones del sulfato de amonio y nitrato de amonio en la composición del $PM_{2,5}$, estuvieron en el rango de 50 a 67%; mientras que Kang et al., citado por Gao (2015), menciona que en Seul, en el año 2004, el nitrato, sulfato y amonio fueron los constituyentes más abundantes del $PM_{2,5}$. Por otro lado, Yepés (2010) menciona que en las zonas urbanas del valle de Aburrá (Colombia) en el periodo 2009-2010, los mismos aniones también fueron las especies químicas más abundantes en la composición del $PM_{2,5}$.

2.3.1.2. MECANISMOS DE ORIGEN

Con respecto a sus fuentes de origen el $PM_{2,5}$ puede ser considerado una partícula primaria o secundaria, a diferencia del PM_{10} que sólo es considerado partícula primaria (USEPA, 2009; Finlayson, citado por Massoud et al. 2011; Gao et al., 2015). Es decir, el $PM_{2,5}$ puede ser originado e introducido a la atmósfera a partir de una fuente de emisión directa de éste contaminante al aire, o a partir de reacciones químicas entre gases contaminantes precursores en condiciones atmosféricas tales que favorezcan la ocurrencia de dichas reacciones químicas.

Dentro de las fuentes de origen de $PM_{2,5}$ como partícula primaria son más importantes las fuentes antrópicas (USEPA, 2009). Dentro de las fuentes antrópicas destacan los procesos industriales (combustión de productos fósiles, fundición de metales como cobre y cinc, y la producción de cemento, cerámica, ladrillos, entre otros), actividades agropecuarias (quema de biomasa), actividades domésticas (combustión de leña), actividades mecánicas que causan resuspensión de polvo y tráfico vehicular (emisiones de los motores de los vehículos, principalmente vehículos diesel) (USEPA, 2009; Finlayson, citado por Massoud et al. 2011;

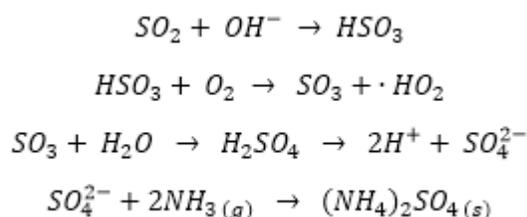
Silva et al., 2013; Gao et al., 2015). Asimismo, estas fuentes de origen antrópico se pueden clasificar en tres categorías (Ibañez, 2008; SEMARNAT, 2011).

- **Fuente puntual:** referido a fuentes ubicadas en un punto fijo y que tengan como propósito desarrollar actividades industriales, comerciales, servicios u otras actividades que generen emisiones significativas de $PM_{2,5}$ a la atmósfera.
- **Fuente de área:** referido a fuentes numerosas y dispersas que, por sí solas, realizan emisiones no significativas de $PM_{2,5}$ a la atmósfera, pero que en conjunto realizan emisiones significativas.
- **Fuente móvil:** se refiere a todas las fuentes asociadas a las formas de transporte como el parque automotor, por ejemplo.

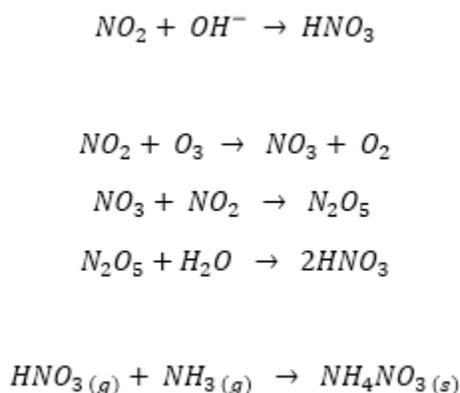
Con respecto a fuentes de origen natural, éstas pueden ser las erupciones volcánicas e incendios forestales, y la ruptura de burbujas de aire en la superficie de mares y océanos (Viana, 2003). Al mismo tiempo, pueden considerarse otras actividades donde no intervenga la mano del hombre.

Por otro lado, respecto a los mecanismos de formación de $PM_{2,5}$ como partícula secundaria, Ibañez (2008) menciona que las partículas finas, en gran parte, son formadas a partir de gases contaminantes precursores que reaccionan químicamente entre ellos. Según la USEPA (2009), el $PM_{2,5}$ como partícula secundaria, puede ser producido por la oxidación de contaminantes precursores tales como el SO_2 y NO_x a sus respectivos ácidos, seguidos de una neutralización con amoníaco (NH_3). Con respecto al dióxido de azufre (SO_2), la vía de formación de $PM_{2,5}$ ocurre cuando el dióxido de azufre es oxidado en la atmósfera para formar ácido sulfúrico (H_2SO_4), el cual puede ser neutralizado por el amoníaco (NH_3) para formar el sulfato de amonio ($(NH_4)_2SO_4$) (Ibañez, 2008; USEPA, 2009). La ocurrencia de éstas reacciones y por ende la formación de $PM_{2,5}$ por medio de esta vía, se ve favorecida bajo condiciones atmosféricas de

temperaturas frías y de alta humedad relativa (Ibañez, 2008; Kulshrestha et al., 2009; Sun et al., citado por Gao 2015). A continuación, se muestra a detalle ésta vía de formación de PM_{2,5}:



Para el caso de los óxidos de nitrógeno (NO_x), la vía de formación de PM_{2,5} consiste en la oxidación del dióxido de nitrógeno a ácido nítrico (HNO₃), el cual puede reaccionar con el amoníaco (NH₃) para formar nitrato de amonio (NH₄NO₃) (Ibañez, 2008; USEPA, 2009). La ocurrencia de éstas reacciones y por ende la formación de PM_{2,5} por medio de esta vía, se ve favorecida bajo condiciones atmosféricas de temperaturas frías y de alta humedad relativa (Ibañez, 2008; Kulshrestha et al., 2009; Sun et al., citado por Gao 2015), así como en días de menor radiación solar (Khan et al., 2009; Liu et al., 2015). A continuación, se muestra a detalle ésta vía de formación de PM_{2,5}:



Asimismo, según Santiago (2013), el PM_{2,5} como partícula secundaria puede formarse por la oxidación de los compuestos orgánicos volátiles (COV) precursores en la atmósfera, por medio de radicales OH[·], NO₃[·] o por medio de O₃. Esta reacción química da como resultado compuestos

capaces de condensar y con volatilidad baja suficiente como para formar aerosoles orgánicos (partículas) (ver Figura 1) y con ello $PM_{2.5}$ mediante asociación por nucleación o formación de enlaces con otras partículas. Ésta reacción se ve favorecida ante la presencia de luz solar (Santiago, 2013).

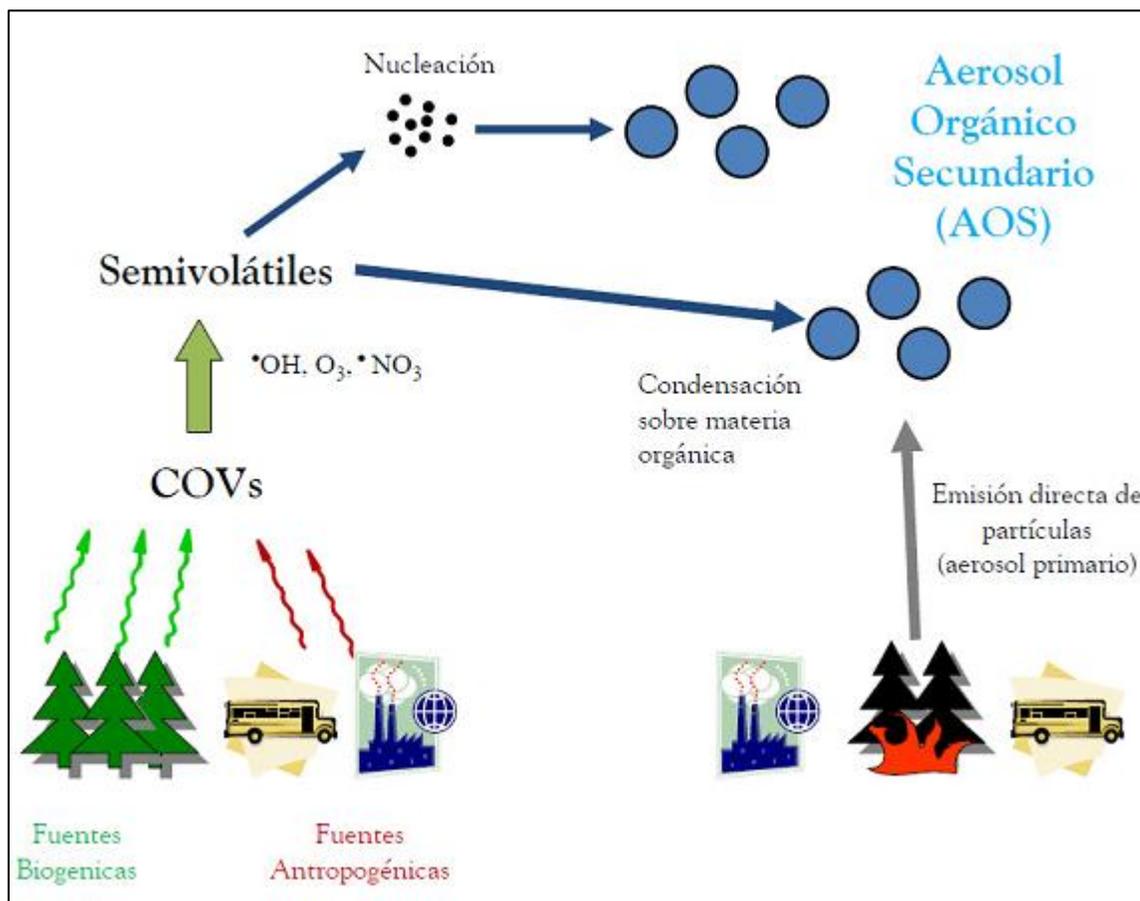


Figura 1. Mecanismo de formación de aerosoles orgánicos (partículas) componentes del $PM_{2.5}$. FUENTE: Santiago (2013)

Por lo tanto, es importante conocer el origen de los contaminantes precursores del $PM_{2.5}$ como partícula secundaria ($PM_{2.5}$ secundario), para entender la composición de éste en entornos industriales, urbanos y rurales.

- El dióxido de azufre (SO_2) es originado por la quema de combustibles que tienen un alto contenido o porcentaje de azufre por parte del parque automotor (vehículos de carga pesada, principalmente), y por fundición de metales ricos en sulfatos. Éste contaminante es generado principalmente por industrias y por el parque automotor. Su tiempo de vida en la atmósfera es de pocos días, el cual depende de la rapidez con la que se transforma en ácido sulfúrico al reaccionar con agua, la cual varía según las condiciones atmosféricas presentes (alta o baja humedad) (Ibañez, 2008; SEMARNAT, 2011).
- Los óxidos de nitrógeno (NO_x) son liberados a la atmósfera a partir de las emisiones del tubo de escape de vehículos motorizados, principalmente de aquellos vehículos antiguos o con inadecuado mantenimiento. Éste contaminante se genera por la quema de combustibles fósiles (gasolina, petróleo y gas natural) y por la quema de biomasa (ASPB, s.f.; MAGRAMA, s.f.; Viana 2003).
- El amoníaco (NH_3) se puede generar natural y antrópicamente. Es un gas incoloro con olor característico de productos de limpieza domésticos e industriales. Puede generarse a partir de la degradación de residuos y biomasa, así como por el uso de fertilizantes nitrogenados, o a partir de emisiones de procesos de la industria textil, papel, alimentos y bebidas, y limpieza (MAGRAMA, s.f.; Viana, 2003).
- Los compuestos orgánicos volátiles (COVs) pueden ser emitidos por actividades antrópicas como la quema de combustibles fósiles por el parque automotor, quema de biomasa, desgaste de llantas y procesos industriales. Los COVs son compuestos muy reactivos y tienen un tiempo de vida en la atmósfera del orden de minutos y horas; esto debido a que son capaces de oxidarse rápidamente, sobre todo, con radicales OH^\cdot , el cual a nivel global representa el principal oxidante atmosférico de los COVs en atmósferas urbanas y rurales (Santiago, 2013).

2.3.1.3. PERMANENCIA EN LA ATMÓSFERA

Las partículas finas ($PM_{2,5}$) poseen un tiempo de residencia en la atmósfera que va de días a semanas. Éste tiempo de residencia del $PM_{2,5}$ en la atmósfera está relacionado, principalmente, con el tamaño de las partículas, así como con sus propiedades termodinámicas.

Con respecto al tamaño de las partículas, el $PM_{2,5}$ puede ser removido de la atmósfera por medio de procesos como la sedimentación o deposición seca (transferencia de partículas desde el aire por sedimentación gravitacional sobre una superficie o por impacto en superficies debido a movimientos turbulentos) y la precipitación o deposición húmeda (lavado de la atmósfera ocasionada por la lluvia), la cual es la más común (USEPA, 2009) (ver Figura 2). Por otro lado, con respecto a las propiedades termodinámicas de las partículas, que se refieren a la distribución de la masa entre fase gaseosa y de partícula lo cual depende de la temperatura y la humedad atmosférica; se espera que ocurran cambios en las concentraciones de $PM_{2,5}$ cuando ocurran cambios en la temperatura y humedad del ambiente, es decir, se espera una mayor permanencia y concentración de partículas finas (asociadas con sulfatos o nitratos de amonio) ante condiciones de bajas temperaturas y alta humedad atmosférica (USEPA, 2009; SEMARNAT, 2011).

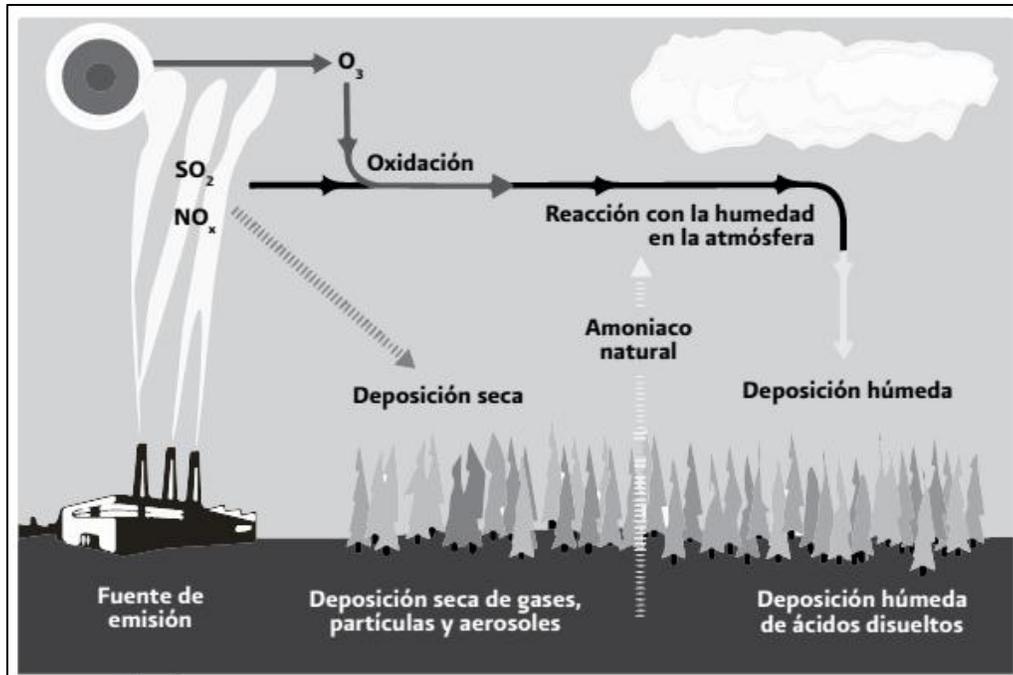


Figura 2. Esquema de la deposición del PM_{2.5}. FUENTE: SEMARNAT (2011)

2.3.2. EFECTOS E IMPORTANCIA

Uno de los efectos del PM_{2.5} está referido a la afectación de la salud humana, debido a que una exposición a éste contaminante supone uno de los principales riesgos para la salud en el ámbito de la contaminación atmosférica. Debido a su tamaño, éste contaminante penetra con facilidad el sistema respiratorio y se deposita en los alveolos pulmonares, región del pulmón en la que se da el intercambio de gases (CAFE Programme, 2004; OMS, 2006) (ver Figura 3). Actualmente, muchos estudios a nivel mundial han demostrado que la exposición a la contaminación provocada por el PM_{2.5} presenta asociaciones positivas con las tasas de mortalidad y morbilidad de la población expuesta (Brunekreef et al., 1995; Schwartz, 1996; OMS, 2006). Asimismo, según Schwartz (1996), estudios epidemiológicos han comprobado que existe una fuerte correlación entre las concentraciones de material particulado y los problemas respiratorios, determinando que un incremento de las concentraciones de material particulado fino (PM_{2.5}) puede incrementar el número de ingresos hospitalarios y de mortalidad diaria. La exposición a concentraciones elevadas de PM_{2.5} puede causar enfermedades pulmonares de obstrucción crónica, reducción en la capacidad funcional del pulmón tanto en niños como adultos,

incremento de la probabilidad de adquirir cáncer al pulmón, y reducción en la expectativa de vida debido a mortalidad cardiopulmonar (Pope III et al, citado por Yepés et al. 2010). Por lo tanto resulta importante identificar los niveles de concentración de $PM_{2.5}$ para conocer si la salud de las personas está siendo afectada por los efectos que causa éste contaminante.

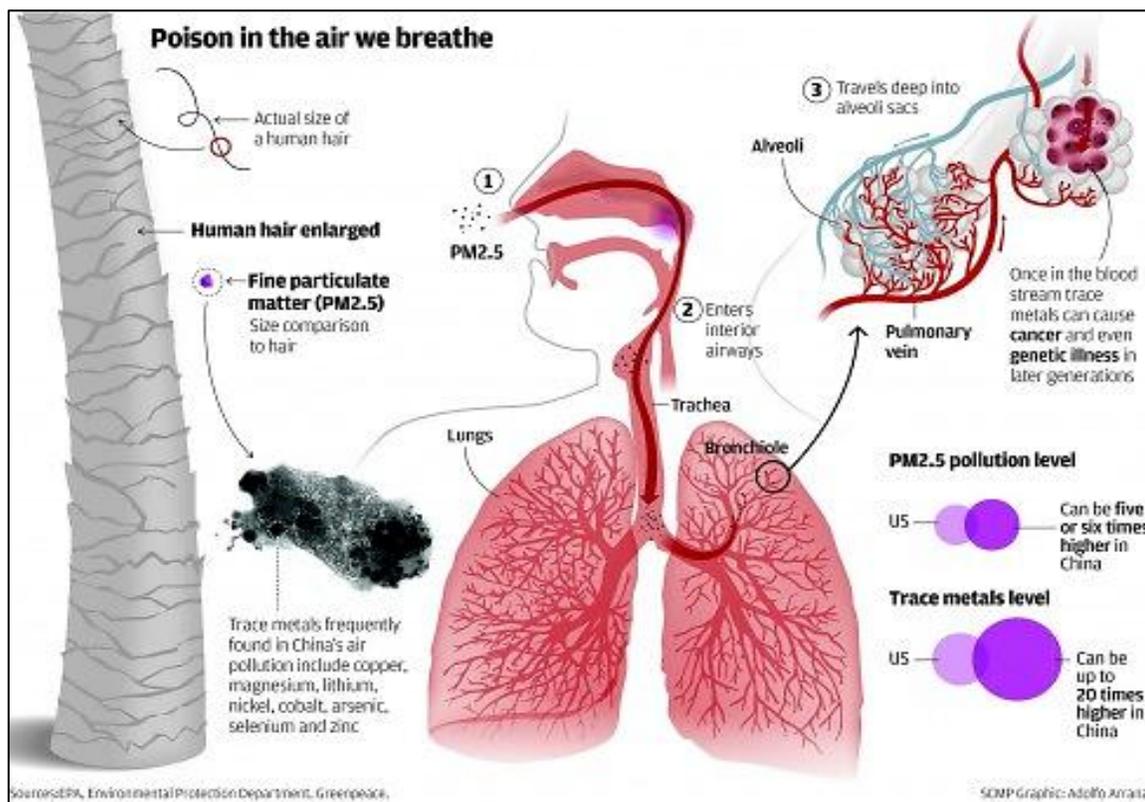


Figura 3. Región del sistema respiratorio alcanzado por material particulado de acuerdo a su tamaño. FUENTE: sitio web de South China Morning Post.

Además de sus efectos sobre la salud, el $PM_{2.5}$ puede generar efectos negativos sobre infraestructuras, ecosistemas, la visibilidad y el clima. Éste contaminante en la atmósfera puede ser transportado por acción del viento, y corroer los materiales de las infraestructuras o construcciones, afectando la apariencia estética de estas. Asimismo, puede depositarse sobre superficies de diferentes ecosistemas como bosques, lagos y suelos, causando efectos negativos como la acidificación y eutrofización, así como daños a la superficie de las plantas y reducción de la capacidad fotosintética de éstas (lo que conlleva a un menor crecimiento) (CRANA, s.f.).

Con respecto a los efectos negativos sobre la visibilidad (definida como la distancia desde la que un objeto puede ser percibido contra el cielo como horizonte), la presencia del $PM_{2,5}$ en el aire impide la transmisión de la luz en la atmósfera, lo cual causa una disminución de la visibilidad de un objeto, haciendo que una reducción de la visibilidad sea una de las pruebas evidentes de un incremento de la concentración de $PM_{2,5}$. En regiones donde el nivel de concentración de $PM_{2,5}$ se encuentra alrededor de $20 \mu g/m^3$, la visibilidad media oscila entre 50 a 60 Km, mientras que en las áreas urbanas donde los niveles de concentración de $PM_{2,5}$ se encuentran alrededor de $100 \mu g/m^3$, la visibilidad media se reduce entre 8 y 10 Km (CRANA, s.f.; SEMARNAT, 2011). En lo que refiere a efectos negativos sobre el clima, según el IPCC (1996), las partículas finas ($PM_{2,5}$) están consideradas como uno de los contaminantes atmosféricos con mayor impacto en el clima debido a que la presencia de éstas partículas en la atmósfera influye en el balance radiactivo absorbiendo o dispersando la radiación solar, lo cual influye directamente en el clima local, regional y global, causando enfriamiento de la superficie.

2.3.3. CONTROL Y VIGILANCIA ACTUAL DE LA CALIDAD DEL AIRE RESPECTO AL $PM_{2,5}$

2.3.3.1. ESTÁNDARES NACIONALES E INTERNACIONALES DE CALIDAD DEL AIRE PARA $PM_{2,5}$

Actualmente el Perú cuenta con Estándares Nacionales de Calidad Ambiental del Aire, los cuales fueron anunciados y puestos en vigencia mediante el Decreto Supremo N° 074-2001-PCM y el Decreto Supremo N° 003-2008-MINAM. Tales estándares fueron establecidos con la finalidad de proteger y mejorar la calidad del aire y, por ende, para proteger la salud de las personas. El Estándar Nacional de Calidad Ambiental del Aire para $PM_{2,5}$ está enunciado en el Decreto Supremo N° 003-2008-MINAM, el cual establece una lista de concentraciones de contaminantes atmosféricos que, por debajo de las cuales, se puede garantizar una buena calidad ambiental. Dicho decreto supremo describe el Estándar Nacional de Calidad del Aire para $PM_{2,5}$ tal como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Estándar Nacional de Calidad Ambiental del Aire para PM_{2,5}.

Parámetro	Periodo	Valor	Vigencia	Formato	Método de Análisis
Material Particulado con diámetro menor a 2,5 micras (PM _{2,5})	24 horas	25 µg/m ³	1 de enero de 2014	Media Aritmética	Separación Inercial / Filtración (gravimetría)

FUENTE: Decreto Supremo N° 003-2008-MINAM. Ministerio del Ambiente.

Es decir, el Estándar de Calidad Ambiental del Aire para PM_{2,5}, para un periodo de 24 horas es de 25 µg/ m³

Por otro lado, el Organismo Mundial de la Salud (OMS), como organismo internacional, establece valores de concentración guías o referenciales de contaminantes atmosféricos para que países, especialmente aquellos en vías de desarrollo, los utilicen o tengan en consideración al momento de establecer leyes y normas que ayuden a controlar, proteger y mejorar la calidad del aire dentro de su territorio. Los valores guías o referenciales para la concentración de PM_{2,5} establecidos por este organismo internacional se menciona, a continuación, en la Tabla 2.

Tabla 2. Valor Guía o Referencial para la concentración de PM_{2,5} en el Aire, según el Organismo Mundial de la Salud.

Parámetro	Valor	Periodo
Material Particulado	10 µg/ m ³	Annual
con diámetro menor a 2,5 micras	25 µg/ m ³	24 horas

FUENTE: Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre. Organización Mundial de la Salud.

La OMS menciona que si la concentración promedio anual y la concentración promedio para 24 horas no exceden los valores de 10 y 25 µg/m³, respectivamente, la salud de las personas no estaría siendo afectada. Sin embargo, menciona a la vez que se debe desarrollar más investigación para corroborar tal hipótesis (OMS, 2006).

2.3.3.2. ÍNDICE NACIONAL DE LA CALIDAD DEL AIRE (INCA)

El índice de la calidad del aire es una de las herramientas más efectivas, diseñada por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (U.S. EPA), que permite la interpretación de manera simple del estado de la calidad del aire previamente monitoreado (Toro, 2006). Es un índice utilizado para notificar la calidad del aire a diario, el cual indica el grado de contaminación atmosférica, los efectos en la salud que implica y algunas recomendaciones a tener en cuenta (USEPA, s.f.). Ésta herramienta, a su vez, es utilizada por muchos países en el mundo, los cuales la han adaptado de acuerdo a sus políticas y normas ambientales relacionadas a la calidad del aire, con la finalidad de generar una información que se ajuste mejor a la realidad del país.

En el caso de Perú, ésta herramienta ha sido adaptada en base a los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental del Aire y el valor umbral de aplicación de los Niveles de Estados de Alerta de Cuidado para contaminantes del aire (ver Anexo 1), y permite calcular el Índice Nacional de Calidad del Aire (INCA) para los seis contaminantes atmosféricos criterios considerados por el país, incluido entre ellos el $PM_{2.5}$. Cabe hacer mención que el INCA fue establecido por el Ministerio del Ambiente del Perú (MINAM), y puesto en vigencia a través de la R.M. N° 181-2016-MINAM, el 14 de julio del año 2016.

El INCA para el contaminante $PM_{2.5}$ permite convertir las concentraciones de éste, expresadas en $\mu g/m^3$, a valores adimensionales que pueden ir de 0 a 500 (valores que puede tomar el INCA); esto con la finalidad de facilitar la interpretación de un nivel de concentración determinado. Mientras más alto es el valor del INCA mayor es el nivel de contaminación atmosférica, en éste caso por $PM_{2.5}$, y por ende más expuesta está la salud de las personas a los efectos adversos causados por éste contaminante. Asimismo, los valores que toma el INCA están seccionados en cuatro rangos o intervalos, cada uno de los cuales están asociados a colores y a una clasificación de la calidad del aire que va desde *buena* hasta *valor umbral del estado de cuidado (VUEC)*, los cuales facilitan la comprensión del estado de la calidad del aire por cualquier persona. El método del cálculo del Índice Nacional de Calidad del Aire se detalla en la sección Metodología.

Según Toro (2006), la definición y establecimiento de un Índice Nacional de Calidad del Aire para un país contribuye a la toma de decisiones, la adopción y al fomento de políticas que busquen mejorar la calidad de vida de la población basándose en los efectos que pueda generar los contaminantes atmosféricos sobre la salud humana. En la Tabla 3 y en la Tabla 4 se muestra los valores del INCA con sus correspondientes clasificaciones de calidad del aire, cuidados a la salud y recomendaciones.

Tabla 3. Rangos de valores del INCA asociados a sus colores correspondientes y su respectiva clasificación de la calidad del aire.

VALORES DEL ÍNDICE (INCAPM_{2,5})	COLOR	CLASIFICACIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE
0 – 50	Verde	Buena
51 – 100	Amarillo	Moderada
101 – 500	Naranja	Mala
>500	Rojo	Umbral de cuidado

FUENTE: R.M. N° 181-2016-MINAM, Establecer el Índice de Calidad del Aire – INCA y crear el Sistema de Información de Calidad del Aire – INFO AIRE PERÚ.

Tabla 4. Efectos negativos sobre la salud y declaraciones preventivas según clasificación de la calidad del aire con respecto al PM_{2,5}.

CLASIFICACIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE	CUIDADOS	RECOMENDACIONES
Buena	La calidad del aire es satisfactoria y no representa un riesgo para la salud.	La calidad del aire es aceptable y cumple con el ECA de Aire. Puede realizar actividades al aire libre.
Moderada	La población sensible (niños, tercera edad, madres gestantes, personas con enfermedades respiratorias crónicas y cardiovasculares) podrían experimentar algunos problemas de salud.	La calidad del aire es aceptable y cumple con el ECA de aire. Puede realizar actividades al aire libre con ciertas restricciones para la población sensible..
Mala	La población sensible podría experimentar problemas de salud. La población sensible en general podría sentirse afectada.	Mantenerse atento a los informes de calidad del aire. Evitar realizar ejercicio y actividades al aire libre.
Dañina a la salud	La concentración del contaminante puede causar efectos en la salud de cualquier persona y efectos serios en la población sensible, tales como niños, ancianos, madres gestantes, personas con enfermedades pulmonares obstructivas crónicas y cardiovasculares.	Reportar a la Autoridad de Salud para que declare los Niveles de Estados de Alerta de acuerdo al Decreto Supremo N° 009-203-SA y su modificatoria Decreto Supremo N° 012-2005-SA.

FUENTE: R.M. N° 181-2016-MINAM, Establecer el Índice de Calidad del Aire – INCA y crear el Sistema de Información de Calidad del Aire – INFO AIRE PERÚ.

2.3.4. VARIACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DEL PM_{2,5}

2.3.4.1. FACTORES QUE AFECTAN LA CONCENTRACIÓN DEL PM_{2,5} EN EL AIRE

Uno de los factores que pueden afectar o tener influencia sobre la concentración de PM_{2,5}, en un área determinada, son las fuentes de emisión de PM_{2,5} locales o cercanas (Salvador et al., 2011), las cuales generalmente suelen ser fuentes antrópicas. Sin embargo, existen otros factores que también ejercen influencia sobre las concentraciones de PM_{2,5} (Querol et al., 2004); uno de ellos son las variables meteorológicas (Viana, 2003; García y Tantaleán, 2008; Salvador, 2011; Hu et al., 2014; Palacio et al., 2014).

Muchos autores han realizado investigaciones sobre la relación entre el material particulado fino (PM_{2,5}) y las variables meteorológicas en diferentes partes del mundo por medio del cálculo de coeficientes de correlación, determinando que la temperatura, precipitación, humedad, viento, y radiación solar son las variables meteorológicas con mayor influencia sobre las concentraciones de PM_{2,5} (García y Tantaleán, 2008; Kulshrestha, 2009; Silva et al., 2013). Con respecto al viento, éste puede afectar la concentración de PM_{2,5} por medio del transporte de éste contaminante, causando acumulación o disipación del mismo sobre un área (Salvador et al., 2011; David, 2013; Grivas et al., citado por Silva 2013; Hu et al., 2014). Por otro lado, niveles elevados de humedad relativa y bajas temperaturas, como ya se mencionó, afectan la concentración de PM_{2,5} ya que favorecen su aumento, debido que la atmósfera se convierte en un medio adecuado para que se desarrollen procesos que involucran reacciones químicas entre contaminantes atmosféricos precursores para formar PM_{2,5} (Kulshrestha et al., 2009; Sun et al., citado por Gao et al., 2015); además, niveles altos de humedad relativa generalmente están asociados con una atmósfera estable, lo cual no favorece la dispersión de las partículas finas (PM_{2,5}) (Kulshrestha et al., 2009). Asimismo, la radiación solar es otra variable meteorológica que puede afectar la concentración de PM_{2,5} debido a que favorece la ocurrencia de reacciones de oxidación de COVs en la atmósfera, y por ende a la formación de partículas finas secundarias a partir de aerosoles orgánicos (Khan et al., 2009; Liu et al., 2015). Por otro lado, la variable

meteorológica precipitación afecta la concentración de $PM_{2,5}$ debido a que causa un lavado de la atmósfera (deposición húmeda), haciendo que las concentraciones bajas del contaminante estén asociadas a días con lluvia (Candanoza et al., 2013); sin embargo, en Lima la precipitación es escasa y poco intensa, por lo tanto el lavado de la atmósfera no es intenso; por ello en la presente investigación no se analizó la relación de la concentración del $PM_{2,5}$ con ésta variable meteorológica.

2.3.4.2. VARIACIÓN TEMPORAL Y ESPACIAL DE LA CONCENTRACIÓN DEL $PM_{2,5}$

Hasta la fecha, numerosos estudios sobre contaminación del aire por $PM_{2,5}$ han corroborado que los niveles de concentración de éste contaminante no se mantienen constante en distintos puntos (zonas), principalmente si estos están alejados unos de otro, ni en diferentes días. CAFE Programme (2004), USEPA (2009), Van der Wal y Janssen, Giri et al., citados por Silva et al. (2013) mencionan que tal dinámica de la concentración de $PM_{2,5}$ indica que presenta variación espacial y temporal, generalmente vinculada a condiciones topográficas y meteorológicas de una zona, así como también al desarrollo de actividades donde se emite $PM_{2,5}$ o precursores de éste.

Para evaluar ésta variación temporal y espacial de la concentración de $PM_{2,5}$, muchos investigadores han hecho uso de pruebas estadísticas para calcular coeficientes de correlación (r) entre dos variables iguales o diferentes (Blanchart et al (1999), Pinto et al. 2004, Wilson et al. 2005, Krudysz et al. 2008, Massoud et al. 2011, Silva et al. 2013, Hu et al. 2014, Palacio et al. 2014).

La correlación es el método de análisis adecuado para conocer la posible relación entre dos variables cuyos datos son cuantitativos; así un coeficiente de correlación es el índice que permite conocer el grado de asociación entre dos variables numéricas (Pértegas y Pita, 2002). Por ello, para evaluar la variación estacional de la concentración de $PM_{2,5}$ en relación a variables

meteorológicas resulta útil determinar el nivel de relación existente entre la concentración de $PM_{2,5}$ y las variables meteorológicas (temperatura, humedad, viento, y radiación solar, principalmente) por medio del cálculo de coeficientes de correlación (Silva et al., 2013; Massoud et al., 2011).

Además de las pruebas estadísticas de correlación, existen otras pruebas estadísticas para comparar medias o medianas poblacionales entre grupos de datos de concentración de $PM_{2,5}$, con la finalidad de determinar si son similares o diferentes, las cuales son utilizadas tanto en los análisis de variación temporal como en los de variación espacial de la concentración de $PM_{2,5}$. Asimismo, existen otras herramientas que son útiles para complementar los análisis de la variación temporal y espacial; herramientas como el Índice nacional de Calidad del Aire (INCA), así como los gráficos de barras o de líneas, pueden ser utilizados para interpretar la variación temporal, mientras que herramientas como un mapa de isóneas de concentración pueden ser útiles para interpretar la variación espacial de la concentración de $PM_{2,5}$.

2.3.5. MÉTODO DE MUESTREO Y DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE $PM_{2,5}$

Actualmente existen diferentes tecnologías y métodos que permiten determinar la concentración del material particulado fino. Sin embargo, en la legislación peruana los D.S. N°. 074-2001-PCM y D.S. N° 003-2008-MINAM establecen, además de los Estándares de Calidad Ambiental para Aire, el método de referencia nacional para la determinación de la concentración del material particulado fino ($PM_{2,5}$), el cual es el método gravimétrico (DIGESA, 2005).

Según DIGESA (2005) e Ibañez (2008), el método gravimétrico consiste en la recolección de material particulado en un filtro durante un periodo de 24 ± 1 hora, por medio del uso de un equipo muestreador de alto o bajo volumen que aspira el aire del ambiente a flujo constante a través de un cabezal que permite separar el material particulado en fracciones de un rango determinado.

El filtro es pesado antes y después de la colección de la muestra para poder determinar el peso neto de la muestra colectada, por medio de una diferencia de pesos. Antes de cada pesado del filtro se debe equilibrar sus condiciones de humedad (utilizando una campana desecadora, por ejemplo). El volumen de aire muestreado debe estandarizarse, realizando su conversión a condiciones estándar (25°C y 1 atm), aunque muchas veces el equipo muestreador está diseñado para otorgar el dato de volumen de aire muestreado ya en condiciones estándar (volumen estándar). Finalmente, la concentración del material particulado se calcula dividiendo el peso neto de la muestra entre el volumen de aire muestreado. El resultado se expresa en microgramos por metro cúbico estándar ($\mu\text{g}/\text{m}^3$.std).

2.4. PRUEBAS ESTADÍSTICAS EN MINITAB 17

En la mayoría de investigaciones es necesario hacer uso de pruebas estadísticas para obtener conclusiones al analizar un grupo de datos o al comparar dos o más de estos. Existe una gran variedad de pruebas estadísticas las cuales tienen una función específica cada una, y depende del investigador cuál utilizar, según su conveniencia y las características de sus datos.

La complejidad de las pruebas estadísticas puede variar de una a otra; algunas suelen ser muy extensas y tediosas de resolver, mientras que otras son breves y consisten en operaciones sencillas; sin embargo, la operatividad de las pruebas estadísticas y el tiempo invertido para resolverlas puede verse reducido significativamente utilizando algún *software* estadístico. El *software* Minitab 17 es un paquete estadístico que permite realizar desde pruebas estadísticas básicas hasta pruebas más complejas; por lo tanto, resulta útil para el análisis de resultados en investigaciones sobre la calidad del aire ya que permite realizar pruebas comparativas o de correlación entre grupos de datos al momento de evaluar la variación temporal y espacial de concentraciones de algún contaminante atmosférico, en este caso $\text{PM}_{2.5}$.

Las pruebas estadísticas se clasifican en dos grandes grupos, las pruebas paramétricas y las no paramétricas (Rojas, 2003). Ambas pruebas sirven para realizar comparaciones o determinar correlaciones entre dos o más grupos de datos; de hecho, la mayoría de pruebas paramétricas tienen su contraparte no paramétrica. Básicamente, las pruebas paramétricas y sus contrapartes no paramétricas cumplen funciones semejantes; sin embargo, la diferencia entre ellas reside en que en el caso de las pruebas paramétricas, para poder utilizarlas, se requiere que los grupos de datos a analizar tengan distribución normal (es decir, en cada uno de los grupos, la mayoría de datos tienen un valor cercano a la media del grupo), que exista homogeneidad de varianzas (varianzas iguales) entre ellos, y que las muestras sean independientes (el valor de una muestra no afecta al valor de otra); mientras que en el caso de las pruebas no paramétricas, para poder utilizarlas, no se requiere que se cumplan dichos requisitos (Rodríguez et al., s.f.; Rojas, 2003; Minitab Inc., 2013).

Para conocer si un grupo de datos tiene distribución normal o si existe homogeneidad de varianzas entre dos o más grupos de datos, se utilizan pruebas estadísticas básicas como la de Normalidad de Anderson Darling y la de Homogeneidad de Varianzas de Bartlett (Minitab Inc., 2013). Es necesario utilizar estas pruebas estadísticas básicas, como paso previo, para determinar qué tipo de prueba estadística (paramétrica o no paramétrica) se debe utilizar en un análisis posterior (de comparación entre grupos de datos o de correlación entre ellos, para el caso de la presente investigación) (Rodríguez et al., s.f.; Rojas, 2003). A continuación, se presenta una tabla de las pruebas estadísticas utilizadas en la presente investigación.

Tabla 5. Pruebas estadísticas comparativas, de correlación y otras que pueden ser desarrolladas por MINITAB 17.

NOMBRE	FUNCIÓN	TIPO	SUPUESTOS	HIPOTESIS	NIVEL DE SIGNIFICACIÓN	RESULTADO	INTERPRETACIÓN
Prueba de Normalidad Anderson-Darling	Prueba si un grupo de datos tiene una distribución normal. En un grupo de datos de concentración de PM _{2,5} con distribución normal, la mayoría de ellos tendrán un valor cercano a la media del grupo.	-	Ninguno	H0: Los datos siguen una distribución normal.	$\alpha = 0.05$ (si el número de datos es menor o igual a 30)	Valor p	Si $p \leq \alpha$, se rechaza la hipótesis nula (H0).
				H1: Los datos no siguen una distribución normal.	$\alpha = 0.01$ (si el número de datos es mayor a 30)		Si $p > \alpha$, no se rechaza la hipótesis nula (H0).
Prueba de Homogeneidad de Varianzas	Prueba si las varianzas de dos o más poblaciones son iguales.	-	Ninguno	H0: Las varianzas no son diferentes.	$\alpha = 0.05$ (si el número de datos es menor o igual a 30)	Valor p	Si $p \leq \alpha$, se rechaza la hipótesis nula (H0).
				H1: Las varianzas son diferentes. / Por lo menos una varianza es diferente.	$\alpha = 0.01$ (si el número de datos es mayor a 30)		Si $p > \alpha$, no se rechaza la hipótesis nula (H0).

t en 2 muestras	Prueba si las medias de dos poblaciones son iguales.	Paramétrica	a) Los dos grupos de datos deben tener distribución normal. b) Existe Homogeneidad de Varianzas	H0: Las medias poblacionales no son diferentes H1: Las medias poblacionales son diferentes	$\alpha = 0.05$ (si el número de datos es menor o igual a 30) $\alpha = 0.01$ (si el número de datos es mayor a 30)	Valor p	Si $p \leq \alpha$, se rechaza la hipótesis nula (H0). Si $p > \alpha$, no se rechaza la hipótesis nula (H0).
U de Mann Whitney	Prueba si las medianas de dos poblaciones son iguales.	No Paramétrica	a) Al menos uno de los dos grupos de datos no debe tener distribución normal. b) Los datos deben ser muestras aleatorias independientes.	H0: Las medianas poblacionales no son diferentes. H1: Las medianas poblacionales son diferentes.	$\alpha = 0.05$	Valor p	Si $p \leq \alpha$, se rechaza la hipótesis nula (H0). Si $p > \alpha$, no se rechaza la hipótesis nula (H0).
Correlación de Spearman	Prueba si existe relación monótona entre dos grupos de datos de la misma o diferentes variables	No Paramétrica	a) Al menos uno de los dos grupos de datos no debe tener distribución normal.	H0: $r = 0$ (el coeficiente no es significativo). H1: $r \neq 0$ (El coeficiente es significativo).	$\alpha = 0.05$ (si el número de datos es menor o igual a 30) $\alpha = 0.01$ (si el número de datos es mayor a 30)	r, Valor p	Si $p \leq \alpha$, se rechaza la hipótesis nula (H0). Si $p > \alpha$, no se rechaza la hipótesis nula (H0). "r" indica el grado de correlación monótona que hay entre los dos grupos de datos de igual o diferente variable.

ANOVA de un solo factor	Prueba si las medias de tres o más poblaciones son iguales.	Paramétrica	a) Todos los grupos de datos deben tener una distribución normal.	H0: Las medias poblacionales no son diferentes.	$\alpha = 0.05$	Valor p	Si $p \leq \alpha$, se rechaza la hipótesis nula (H0).
			b) Los datos deben ser muestras aleatorias independientes.	H1: Al menos una media poblacional es diferente.			Si $p > \alpha$, no se rechaza la hipótesis nula (H0).
Kruskal Wallis	Prueba si las medianas de tres o más poblaciones son iguales.	No Paramétrica	a) Al menos uno de todos los grupos de datos no debe tener distribución normal.	H0: Las medianas poblacionales no son diferentes.	$\alpha = 0.05$	Valor p	Si $p \leq \alpha$, se rechaza la hipótesis nula (H0).
			b) Los datos deben ser muestras aleatorias independientes.	H1: Al menos una mediana poblacional es diferente.			Si $p > \alpha$, no se rechaza la hipótesis nula (H0).

FUENTE: Guía de ayuda de la versión de prueba del *software* Minitab 17.

Como se observa en la Tabla 5, en la presente investigación, se realizan análisis de correlación utilizando las pruebas de correlación de Spearman; por lo tanto, es necesario especificar qué es una relación monótona. Una relación monótona es una tendencia en los datos que refleja que dos variables aumentan o disminuyen simultáneamente (relación monótona positiva), o que una variable aumenta mientras otra disminuye (relación monótona negativa), tal como muestra la Figura 4 (Minitab Inc., 2013). Cuando dicha tendencia puede ser modelada por una línea recta se dice que la relación monótona es lineal; es decir, las relaciones lineales también son monótonas (ver Figura 5) (Minitab Inc., 2013). La prueba de correlación de Pearson mide el nivel de relación lineal entre dos grupos de datos, mientras que la prueba de correlación de Spearman mide el nivel de relación monótona.

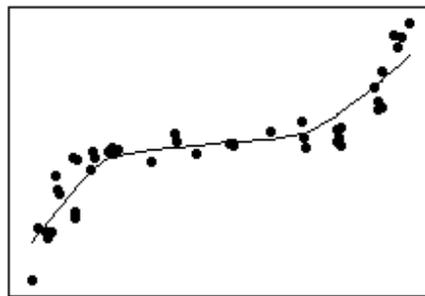


Figura 4. Representación gráfica de una relación monótona. FUENTE: Guía de ayuda de la versión de prueba de Minitab 17.

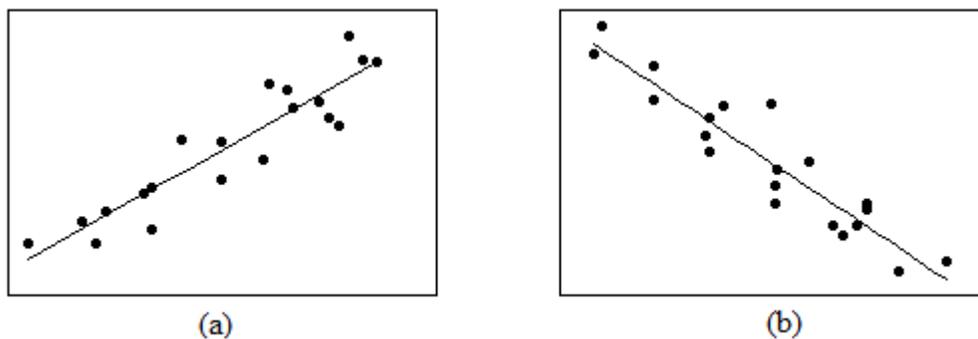


Figura 5. Representación gráfica de una relación monótona lineal positiva (a) y negativa (b). FUENTE: Guía de ayuda de la versión de prueba de Minitab 17.

Asimismo, se debe mencionar que la prueba de correlación de Spearman da como resultado un coeficiente r (coeficiente de correlación de Spearman), el cual es utilizado como indicador del nivel de correlación que guardan dos grupos de datos. El valor de dicho coeficiente oscila entre -1 y 1. Mientras más cercano a 1 o -1 sea el valor del coeficiente indica que existe una relación fuerte entre los grupos de datos cuya relación se está analizando, si es cercano a 0.5 o -0.5 indica que existe una relación media, mientras más cercano a 0 sea dicho valor, indica una relación débil; esto siempre y cuando el coeficiente sea significativo, es decir, la relación existe y el valor del coeficiente no se debe a una consecuencia del azar. Por otra parte, un valor positivo del coeficiente, indica que la relación es positiva, mientras que un valor negativo indica que la relación es negativa.

Por otro lado, se debe mencionar que el *software* Minitab 17 da como resultado un valor p en todas las pruebas de hipótesis que ejecuta. El valor p es un valor en el que hay que concentrarse al momento que se obtienen los resultados de una prueba de hipótesis, ya que este valor debe de compararse con el nivel de significación (α) de la prueba para determinar si la hipótesis nula se rechaza o no. Un valor p oscila entre 0 y 1, y es una probabilidad que mide la evidencia en contra de la hipótesis nula. Las probabilidades más bajas proporcionan una evidencia más fuerte en contra de la hipótesis nula; es decir, cuando el valor p es menor o igual al nivel de significación, la hipótesis nula se rechaza.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. MATERIALES Y EQUIPOS

- Muestreador de partículas activo de bajo volumen marca Partisol modelo 2000-H fabricado por la empresa Rupprecht & Patashnick
- Filtros de fibra de cuarzo de 47 mm de diámetro
- Desecador
- Balanza analítica
- Placas petri plásticas de 60 mm de diámetro (porta filtro)
- Estabilizador de corriente eléctrica
- Versión de prueba del *software* ArcGis 10.2
- Versión de prueba del *software* Minitab 17
- Versión gratuita del *software* WRPLOT 8.0
- Versión gratuita del *software* Google Earth 7.1.7.2.
- Libreta de campo
- Extensión de 25 metros
- Pinza
- Rotulador
- Escaleras
- Soga

3.2. METODOLOGÍA

3.2.1. MEDICIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE PM_{2,5} EN EL AIRE

Esta parte de la metodología explica los procedimientos que se siguieron para cumplir el primer objetivo específico de la presente investigación.

3.2.1.1. ESTABLECIMIENTO DE LA RED DE MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AIRE.

3.2.1.1.1. DEFINICIÓN DEL PARÁMETRO A MONITOREAR

El parámetro que se monitoreó en este estudio fue el contaminante criterio llamado material particulado con diámetro aerodinámico menor a 2,5 micras (PM_{2,5}).

3.2.1.1.2. ÁREA DE ESTUDIO

La presente investigación se realizó en el campus de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM). Entiéndase por *campus* al área interna de la universidad en la cual no se considera los terrenos agrícolas del margen izquierdo de la misma (ver Figura 6). En esta investigación no se consideró tales terrenos agrícolas debido a dos motivos. Primero, porque no se podía establecer un punto de monitoreo allí, ya que los terrenos agrícolas no tenían una fuente de energía cercana necesaria para el funcionamiento del equipo muestreador de PM_{2,5} utilizado; y segundo, porque son extensos y al momento de realizar el análisis de la variación espacial de la concentración de PM_{2,5}, éste sería muy poco representativo en esta zona debido a que no hubo un punto de monitoreo cerca o dentro de estos terrenos.

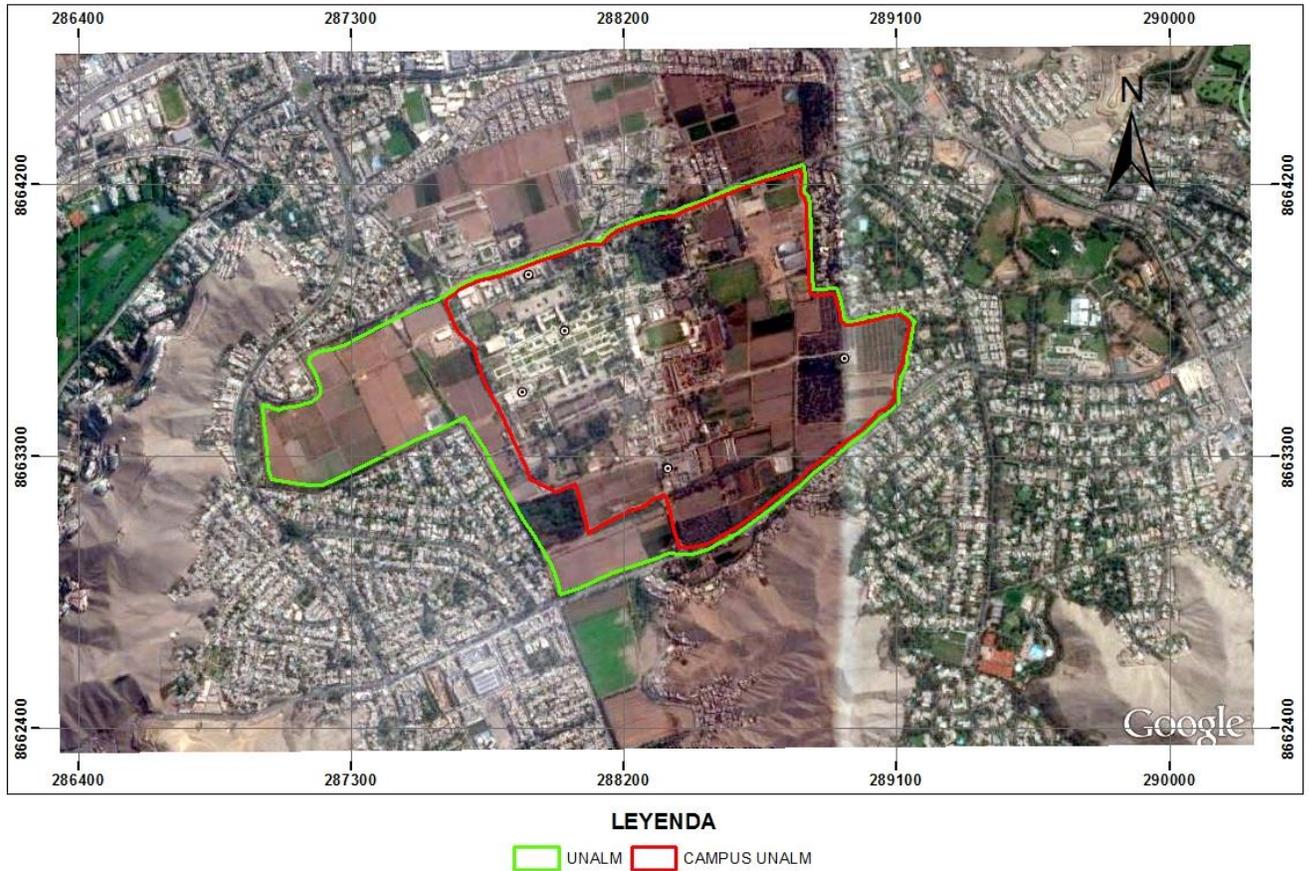


Figura 6. Área de la UNALM y su campus. FUENTE: Elaboración propia usando mapas de Google Earth.

El campus de la UNALM se encuentra ubicado en la ciudad de Lima, en el distrito de La Molina, y cuenta con una extensión de 220 hectáreas, siendo el campus más grande del país. Asimismo, la UNALM cuenta con extensas áreas verdes dentro de su campus, así como áreas de investigación en diferentes especialidades y áreas deportivas. Una de las áreas de investigación es el observatorio meteorológico Alexander Von Humboldt, el cual registra diariamente valores de diferentes variables meteorológicas con la finalidad de usarlos en el desarrollo investigaciones relacionadas con la atmósfera, como es el caso del presente estudio. Ésta estación meteorológica forma parte de la red de estaciones meteorológicas del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI). Otra de las áreas de investigación, que posee la universidad, es el jardín botánico Octavio Velarde Nuñez.

Con respecto a la población de estudiantes universitarios, la UNALM cuenta con un número grande de estudiantes, el cual es de aproximadamente 6424 estudiantes, de los cuales 5176 son estudiantes de pregrado y 1248 son estudiantes de posgrado. Todos ellos, junto con el personal docente, administrativo y de servicios, suman un gran número de personas que, en la presente investigación, se les denominó *comunidad universitaria*.

La UNALM, al ubicarse en el distrito de La Molina, se encuentra en un ámbito urbano. Con respecto a sus límites, la UNALM está rodeada por zonas residenciales principalmente. A continuación, se detallan los elementos que se encuentran en sus límites próximos.

- Por el norte: la avenida La Molina, el Instituto de Desarrollo Agro Industrial (INDDA), el Instituto de Innovación Agraria (INIA), el Centro Internacional de la Papa (CIP), el Servicio Nacional de Sanidad Agraria (SENASA)
- Por el sur: la avenida Raúl Ferrero, vivero forestal de Las Viñas, Cerro de Las Viñas, urbanización La Pradera.
- Por el Oeste: la avenida Alameda del Corregidor, Cerros de Camacho, urbanización La Molina Vieja.
- Por el Este: el club residencial El Haras de La Molina

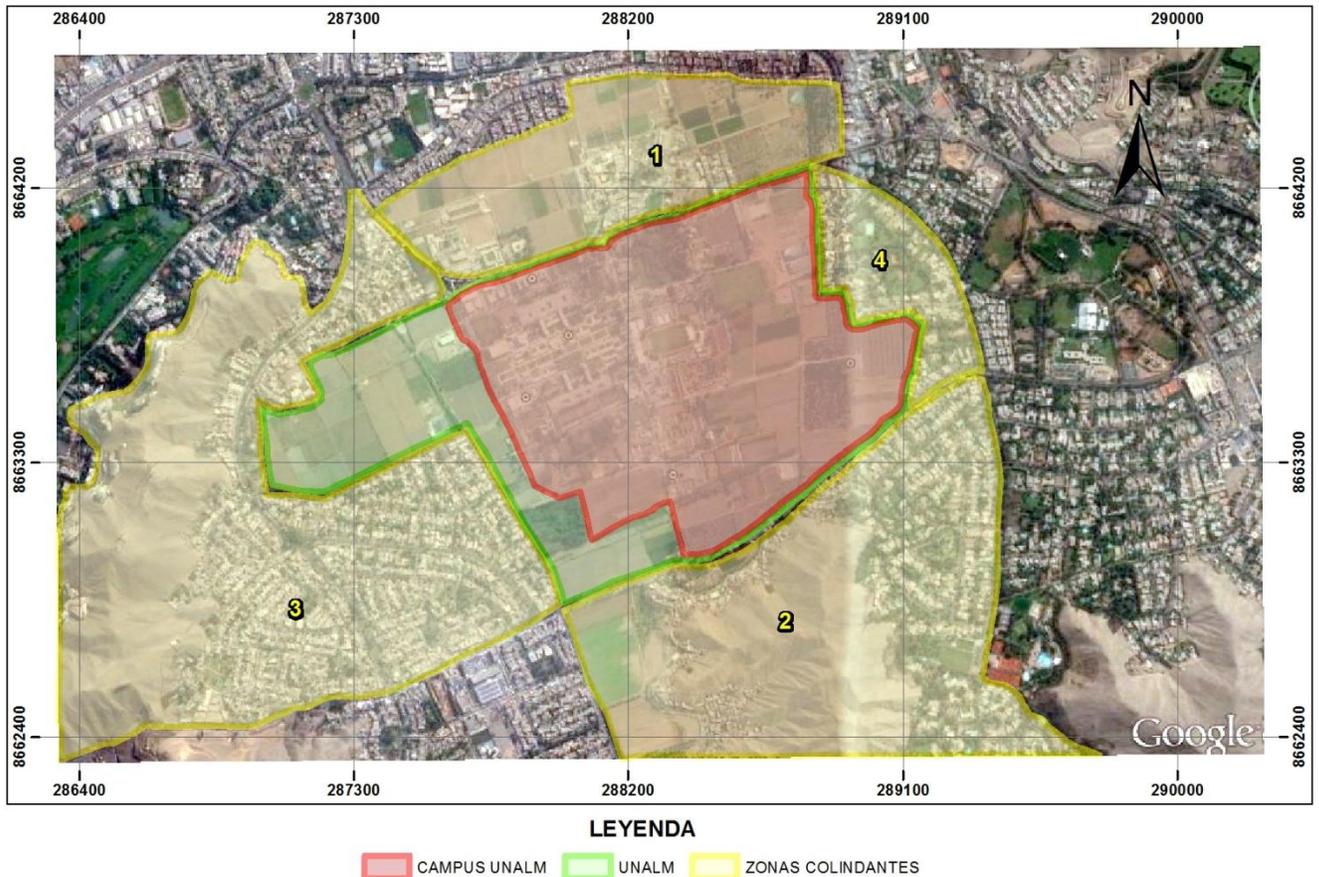


Figura 7. Zonas colindantes o límites de la UNALM (1: zona colindante al norte, 2: zona colindante al sur, 3: zona colindante al oeste, 4: zona colindante al este).

FUENTE: Elaboración propia usando mapas de Google Earth.

3.2.1.1.3. PUNTOS DE MONITOREO

La red de monitoreo de la calidad del aire respecto al $PM_{2,5}$ estuvo compuesta por cinco puntos de monitoreo distribuidos en diferentes zonas de la UNALM. Los criterios o requisitos utilizados para la selección de dichos puntos de monitoreo estuvieron basados en el «Protocolo de Monitoreo de la Calidad del Aire y Gestión de los Datos» de la Dirección General de Salud Ambiental (DIGESA), y fueron los siguientes:

- Fácil acceso
- Seguridad contra vandalismo
- Infraestructura (disponibilidad de energía eléctrica)
- Libre de obstáculos (árboles altos y edificios)
- Ser representativas
- Uso de suelo, densidad de población y salud pública (zona de interés de análisis)

Asimismo, el número y distribución de los puntos de monitoreo dependió, además del objetivo de la investigación y de los criterios de selección de puntos de monitoreo, del área de estudio a ser cubierta, disponibilidad de recursos y del uso final de los datos de concentración de PM_{2.5}. Por lo tanto, los criterios considerados para la determinación del número de puntos de monitoreo y su distribución, fueron los siguientes:

- Tamaño del campus de la UNALM.
- Los recursos económicos, humanos y tecnológicos disponibles.
- Utilidad de la información obtenida en el punto.

Cabe señalar que existen recomendaciones por parte de organismos internacionales para el establecimiento de un número mínimo de puntos de monitoreo, los cuales son técnicamente importantes; sin embargo, el número de puntos de monitoreo a implementarse finalmente depende de las limitaciones presupuestarias con las que se opera tales puntos de monitoreo (DIGESA 2005). Por ello, DIGESA (2005) y Palacio (2014) recomiendan utilizar estaciones

temporales o unidades móviles (equipos que permitan trasladarse de un punto a otro) para poder establecer un número de puntos de monitoreo económicamente viable y que garantice la representatividad del área en estudio.

Los lugares donde se establecieron los puntos de monitoreo fueron los siguientes (ver Figura 8):

- PUNTO 1 (P1): Azotea del Laboratorio de Ingeniería Ambiental.
- PUNTO 2 (P2): Azotea de los Centros Federados.
- PUNTO 3 (P3): Azotea del Auditorio A-4.
- PUNTO 4 (P4): Azotea de la Oficina de Servicios Generales.
- PUNTO 5 (P5): Azotea del Observatorio Meteorológico Alexander Von Humboldt.

Éstos puntos de monitoreo se establecieron con la finalidad de obtener información de interés de análisis con sus ubicaciones estratégicamente seleccionadas. El Punto 1 se estableció con la finalidad de obtener información acerca de la calidad del aire en el área de la UNALM cercana a la Av. La Molina (zona norte del campus), la cual suele ser transitada por vehículo de carga pesada (volquetes), vehículos particulares y de transporte colectivo. El Punto 2 y el Punto 3 se establecieron con la finalidad de obtener información acerca de la calidad del aire en los lugares más concurridos por la mayoría de la comunidad universitaria (zona de centros federados, bibliotecas, facultades y aulas). El Punto 4 se estableció con la finalidad obtener información de la calidad del aire en la zona de la UNALM donde se realizan actividades industriales (Planta Piloto de Leche y la Planta de Alimentos), la cual a su vez se encuentra localizada cerca de la Av. Raúl Ferrero. Finalmente, el Punto 5 se estableció con la finalidad de obtener información acerca de la calidad del aire en la zona de la universidad que está menos expuesta a las actividades humanas.

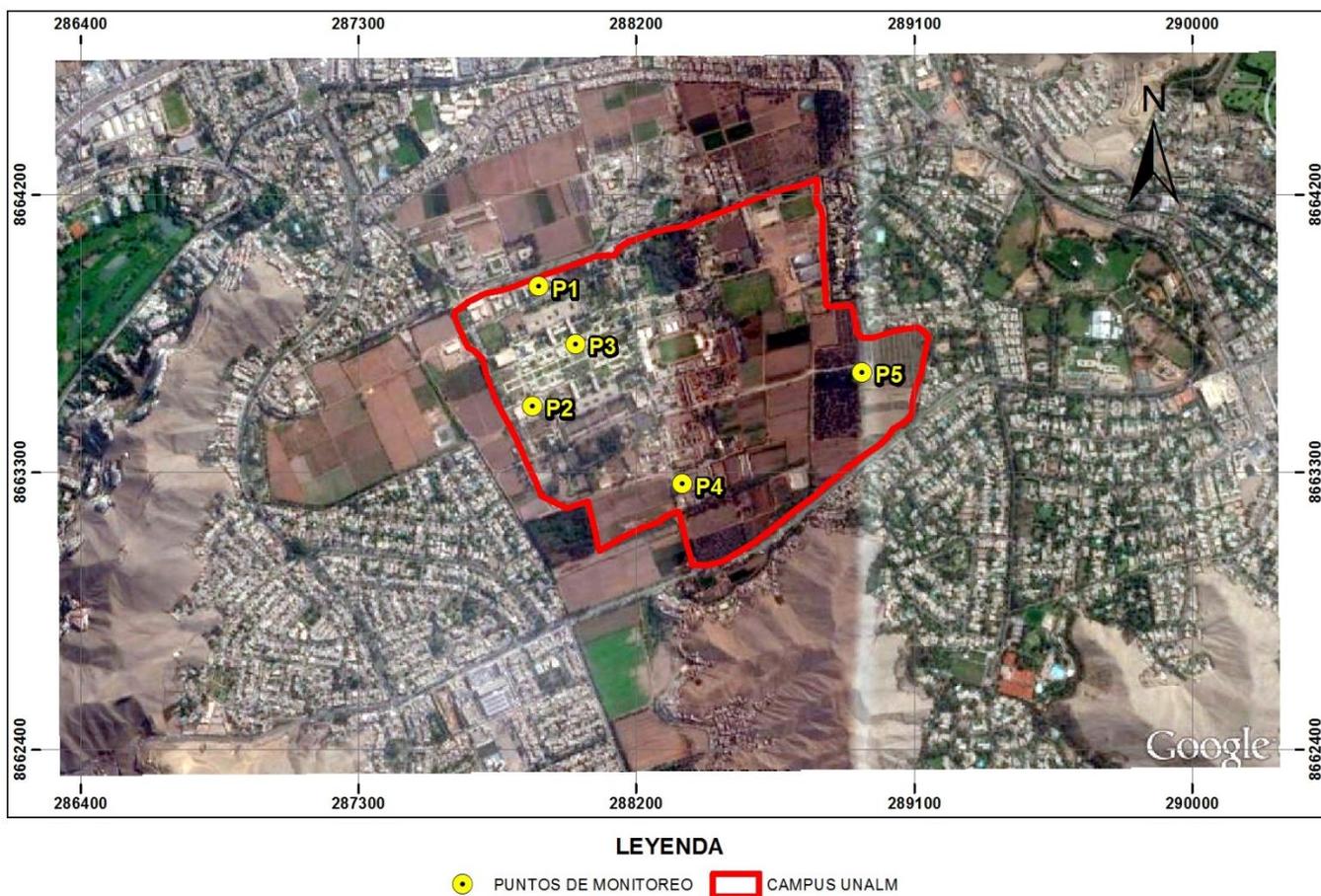


Figura 8. Ubicación de los cinco puntos de monitoreo dentro del campus de la UNALM.

FUENTE: Elaboración propia usando mapas de Google Earth.

Tabla 6. Referencias geográficas de los cinco puntos de monitoreo.

PUNTO DE MONITOREO	COORDENADAS UTM		ALTURA CON RELACIÓN AL SUELO (metros)
	ESTE	NORTE	
P1	287883.00	8663900.00	6.15
P2	287865.00	8663513.00	5.05
P3	288003.00	8663714.00	5.90
P4	288348.00	8663260.00	3.10
P5	288930.00	8663622.00	3.80

FUENTE: Elaboración propia

3.2.1.2. DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DEL PM_{2,5} EN EL AIRE

3.2.1.2.1. PROGRAMA DE MONITOREO

- Duración del monitoreo:

El periodo de tiempo en el que se llevó a cabo las mediciones de la concentración de PM_{2,5} inició el 04 de julio del 2016 y finalizó el 19 de noviembre del 2016.

- Frecuencia de muestreo

La toma de muestras se realizó de forma inter diaria. Al inicio, el equipo muestreador (marca Partisol) se colocó en el Punto 1, y cada dos semanas el equipo era desplazado al siguiente punto, hasta llegar al Punto 5. Durante las dos semanas que el equipo permanecía en un punto, se colectaron 7 filtros con muestras de PM_{2,5}. El monitoreo estuvo programado para que el equipo se coloque dos veces en cada punto; es decir, una vez que el equipo llegó al Punto 5, este se movió nuevamente al Punto 1 para permanecer allí otras dos semanas antes de moverse al Punto 2, y así sucesivamente hasta llegar nuevamente al Punto 5. Una vez que el equipo muestreador pasó dos veces por cada punto, se obtuvieron en total 14 filtros con muestras de PM_{2,5} por cada punto de monitoreo (7 filtros en cuando el equipo se colocó por primera vez en un punto y otros 7 cuando se colocó por segunda vez), sumando un total de 70 filtros con muestra. Las muestras que se tomaron fueron aleatorias e independientes. En el Anexo 2 se detalla de forma gráfica la frecuencia y cronograma de monitoreo.

- Tiempo de toma de muestra

El lapso o duración de la toma de muestra fue de 24 ± 1 horas. Este tiempo de muestreo fue establecido utilizando como guía al «Protocolo de Monitoreo de la Calidad del Aire y Gestión de los Datos» de la DIGESA.

3.2.1.2.2. MÉTODO DE MUESTREO

La toma de muestras se realizó utilizando un equipo muestreador de bajo volumen marca Partisol modelo 2000-H fabricado por la empresa Rupprecht & Patashnick, que fue proporcionado por el Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la Universidad Nacional Agraria La Molina, el cual también brindó los filtros de cuarzo de 47 mm de diámetro necesarios para el funcionamiento del equipo mencionado. Se debe mencionar que el equipo trabajó de 00:00 a 00:00 horas (24 horas) en los días de toma de muestra, con un flujo volumétrico promedio (velocidad a la que el aire es muestreado por el equipo) de 16.7 litros/minuto.

El procedimiento para la toma de las muestras fue dividido en tres etapas, (1) Pre Muestreo, (2) Muestreo y (3) Post Muestreo. Las actividades de las etapas de pre muestreo y post muestreo se llevaron a cabo en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la UNALM, ya que allí se encontraban los equipos a utilizarse en ésta etapa; mientras que las actividades de la etapa de muestreo se llevaron a cabo en el lugar donde se ubicaba el punto de monitoreo (campo). A continuación, en la Tabla 7, se detalla el procedimiento seguido durante las etapas de pre muestreo, muestreo y post muestreo.

Tabla 7. Detalle de procedimientos para la toma de muestras.

ETAPA PRE MUESTREO	
PASO	PROCEDIMIENTO
1	Colocar el filtro muestreador en el desecador por un periodo de 24 horas.
2	Retirar el filtro del desecador pasadas las 24 horas.
3	Pesar el filtro desecado en la balanza analítica y registrar el valor en la libreta de campo
4	Colocar el filtro desecado en una placa petri portafiltro.
5	Rotular e identificar la placa petri según filtro desecado que contenga.

ETAPA MUESTREO	
PASO	PROCEDIMIENTO
1	Llevar el filtro desecado, contenido en la placa petri rotulada, al punto de monitoreo donde se encuentra el Partisol.
2	Retirar el filtro desecado de la placa petri y colocar en el Partisol.
3	Encender el Partisol y programar la fecha para que ocurra el muestreo automático, de 00:00 a 00:00 horas.
4	Retirar el filtro que contiene muestra de PM2.5 y colocar en placa petri rotulada, terminada la toma de muestra (pasado 24 horas).
5	Registrar datos de volumen (estandarizado) de aire muestreado, apagar el Partisol y limpiar externamente, de ser necesario.
6	Trasladar placa petri, que contiene el filtro con muestra, al laboratorio.

ETAPA POST MUESTREO	
PASO	PROCEDIMIENTO
1	Colocar el filtro que contiene muestra de PM2.5 en el desecador por 24 horas.
2	Pasada las 24 horas, retirar el filtro del desecador.
3	Pesar filtro en balanza analítica y registrar valor.

FUENTE: Elaboración propia.

Debe mencionarse que en las tres etapas (pre muestreo, muestreo y post muestreo) se utilizaron pinzas metálicas durante la manipulación del filtro colector de muestra para evitar la contaminación de los mismos. Asimismo, se debe explicar que el rotulado para la identificación una muestra se basó en el formato *PX.YY*, donde *X* representa el punto de monitoreo donde se tomó la muestra ($X = 1, 2, 3, 4$ ó 5), mientras que *Y* representa el número ordinal de la muestra ($Y = 1, 2, 3, \dots, 14$). A modo de ejemplo, el rotulado P1.04 indica que la muestra se tomó en el

punto de monitoreo 1 y es la cuarta muestra (o muestra número cuatro) que se tomó en dicho punto.

Una vez obtenidos los valores del peso de filtro con muestra y sin muestra, y del volumen estandarizado de aire muestreado, se procedió a realizar el cálculo de la concentración de PM_{2,5} correspondiente. Para ello se utilizó la siguiente expresión:

$$C_{PM_{2,5}} = \frac{(PF_f - PF_i)}{V_{std}} \times 10^6$$

Donde:

C_{PM_{2,5}}: Concentración diaria de PM_{2,5} (µg/m³).

PF_f: Peso de filtro con muestra (g).

PF_i: Peso de filtro sin muestra (g)

V_{std}: Volumen estándar de aire muestreado (m³)

Es necesario mencionar que no fue necesario estandarizar el dato de volumen de aire muestreado con respecto a las condiciones de temperatura y presión presentadas durante el día en que se realizó el muestreo. Ésto debido a que el equipo muestreador marca Partisol otorga el dato de volumen muestreado ya en condiciones estándar.

Por otro lado, los datos de concentración de PM_{2,5} obtenidos fueron sometidos a un proceso de validación, para el cual se consideraron dos criterios. Uno de los criterios de validación fue el estado del filtro después de la colección de la muestra; el otro criterio de validación fue el tiempo de toma de muestra real. Es decir, si el filtro se encontraba deteriorado (roto o tocado directamente con las manos) después de la toma de muestra o si el tiempo de toma de muestra

era inferior a 24 ± 1 horas, entonces el dato de concentración respectivo quedaba invalidado (no se utilizaba).

Adicionalmente, junto con las concentraciones calculadas, durante el periodo de monitoreo se fue registrando datos (valores) diarios de las variables meteorológicas temperatura, humedad relativa, viento, precipitación, presión atmosférica y radiación solar, medidos por el Observatorio Meteorológico Alexander Von Humboldt, los cuales se obtuvieron desde el *website* del SENAMHI, excepto los datos de radiación solar los fueron obtenidos en la secretaría del departamento de Ingeniería ambiental, Física y Meteorología de la facultad de Ciencias.

3.2.2. DETERMINACIÓN DE LA VARIACIÓN TEMPORAL DE LA CONCENTRACIÓN DE PM_{2,5} EN EL AIRE

Ésta parte de la metodología explica los procedimientos que se siguieron para cumplir el segundo objetivo específico de la presente investigación.

3.2.2.1. VARIACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE PM_{2,5} POR CICLO DE MONITOREO

Primero, entiéndase por *ciclo* al paso del equipo muestreador desde el primer al quinto punto de monitoreo (desde el Punto 1 al Punto 5) habiendo tomado siete muestras en cada punto. Según lo explicado en la sección *Frecuencia de Muestreo* (ítem 5.2.1.2.1.), se entiende que hubo dos ciclos de monitoreo en la presente investigación, ya que el equipo pasó dos veces por cada punto; entonces, el primer ciclo comprendió las fechas del 04 de julio al 11 de setiembre, y el segundo ciclo las fechas del 12 de setiembre al 19 de noviembre (ver Anexo 2).

Una vez comprendido el concepto de *ciclo* en la presente investigación, se puede asumir que cada ciclo estuvo comprendido dentro de un periodo estacional del año; estando comprendido el primer ciclo en la época de invierno (04 de julio al 10 de setiembre) y el segundo en primavera (11 de setiembre al 19 de noviembre). Por ende, en esta parte de la determinación de la variación temporal de la concentración de PM_{2,5}, se analizó la variación de los niveles de concentración de dicho contaminante entre la época de invierno y de primavera, en cada punto de monitoreo, con la finalidad de determinar si existe o no variación de la concentración de PM_{2,5} entre dichos periodos estacionales. A continuación, se detallan los procedimientos a realizar dentro de este punto de la metodología.

a) Comprobación de la diferencia o igualdad de los grupos de concentraciones de PM_{2,5} obtenidas en invierno y las obtenidas en primavera

Para comprobar si hubo diferencia significativa entre las concentraciones PM_{2,5} obtenidas en el primer ciclo de monitoreo (invierno) con aquellas obtenidas en el segundo ciclo (primavera), en cada punto de monitoreo, se hizo uso de la versión de prueba del *software* estadístico Minitab 17.

Primero se agruparon las concentraciones de PM_{2,5}, obtenidas durante el periodo de monitoreo de acuerdo a la estación en que se obtuvieron (invierno o primavera), por cada punto de monitoreo. Luego, se procedió a realizar la prueba de normalidad de Anderson-Darling tanto para el grupo de concentraciones de PM_{2,5} obtenidas en invierno (7 datos por puntos de monitoreo) como para aquellas obtenidas en primavera (7 datos por punto de monitoreo), por cada uno de los puntos de monitoreo, con la finalidad de determinar si ambos grupos de datos (datos de invierno y primavera) tenían distribución normal. Después se aplicó la prueba de homogeneidad de varianzas sobre los mismos grupos de datos para comprobar si las varianzas fueron iguales. Luego se procedió a utilizar la prueba estadística paramétrica t en dos muestras y la prueba estadística no paramétrica U de Mann Whitney para comprobar si existe diferencia estadística significativa entre los grupos de concentraciones de PM_{2,5} de invierno y de primavera, en cada punto de

monitoreo, por medio de una comparación de medias poblacionales y medianas poblacionales, respectivamente. La prueba t en dos muestras se utilizó cuando los dos grupos de datos de un punto (invierno y primavera) demostraron tener distribución normal, mientras que la prueba U de Mann Whitney se utilizó cuando al menos uno de éstos demostró no tener distribución normal.

b) Determinación del nivel de correlación entre los valores de concentración de PM_{2,5} y los valores de las variables meteorológicas temperatura, humedad relativa, velocidad viento y radiación solar

Para comprobar si existe relación y determinar el nivel de esta entre los valores de concentración PM_{2,5} y los valores de las variables meteorológicas temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y radiación solar, obtenidos durante el periodo de monitoreo, se hizo uso de la versión de prueba del *software* estadístico Minitab 17

Primero se procedió a realizar la prueba de normalidad de Anderson Darling con los datos de concentración de PM_{2,5} y los datos de temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y radiación solar, obtenidos durante todo el periodo de monitoreo (70 datos de concentración de PM_{2,5} y 70 datos por cada variable meteorológica), con la finalidad de determinar si tenían distribución normal. Después se procedió a utilizar la prueba estadística no paramétrica Correlación de Spearman para calcular coeficientes de correlación de Spearman entre la concentración de PM_{2,5} y las variables meteorológicas temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y radiación solar, los cuales se utilizaron como indicador del nivel de relación existente. Ésta prueba también indicó si los coeficientes de correlación calculados fueron significativos o no.

3.2.2.2. VARIACIÓN DIARIA DE LA CONCENTRACIÓN DE PM_{2,5}

Éste punto de la metodología se basó en dos procedimientos para evaluar la variación diaria del a concentración de PM_{2,5}. A continuación se describen los dos procedimientos mencionados.

a) Determinación del número de veces que se superó el Estándar Nacional de Calidad Ambiental del Aire y el Valor Guía de la Organización Mundial de la Salud para PM_{2,5}

En esta sección se determinó la cantidad de veces (en número y proporción) en que los datos de concentración diaria de PM_{2,5} se encontraron por encima del Estándar Nacional de Calidad Ambiental del Aire para PM_{2,5} y el Valor Guía de la OMS para PM_{2,5}. Asimismo, se determinó en cuánto por ciento fue excedido dicho estándar o valor guía, durante los días en que la concentración de PM_{2,5} los superó. En este procedimiento no se utilizaron fórmulas específicas, ya que bastó el conteo simple y el cálculo simple de proporciones o porcentajes. Además, se utilizó la versión de prueba del *software* Minitab 17 para generar un gráfico de cajas, el cual permitió determinar la distribución de los valores de concentración de PM_{2,5} obtenidas durante el periodo de monitoreo.

b) Cálculo del Índice Nacional de Calidad del Aire (INCA)

El método de cálculo del INCA se basó en una sola expresión matemática que fue obtenida de la R.M. N° 181-2016-MINAM, la cual establece la metodología para el cálculo del INCA. La determinación matemática del INCA para el PM_{2,5} se basa en una relación entre el valor registrado de la concentración de dicho contaminante y su correspondiente valor del Estándar Nacional de Calidad Ambiental (25 µg/m³). La expresión matemática utilizada fue la siguiente:

$$I_{(PM_{2,5})} = \frac{[PM_{2,5}]}{25} \times 100$$

Donde:

I_(PM_{2,5}): valor del INCA para PM_{2,5}.

[PM_{2,5}]: valor registrado de la concentración de PM_{2,5} (µg/m³).

Cada valor calculado del INCA fue asociado a un rango de valores y color correspondiente, tal como muestra la Tabla 3 (Pag. 37) y presentado en un gráfico de barras para una adecuada visualización. Asimismo, los valores calculados del INCA también se asociaron con los cuidados y recomendaciones, dictadas por el Ministerio del Ambiente del Perú, mostrados en la Tabla 4 (Pag. 38). Además, se utilizó la versión de prueba del *software* Minitab 17 para generar un gráfico de cajas, el cual permitió determinar la distribución de los valores del Índice Nacional de Calidad del Aire para $PM_{2,5}$ obtenidos durante el periodo de monitoreo.

3.2.2.3. COMPORTAMIENTO DE LA CONCENTRACIÓN DE $PM_{2,5}$ EN RELACIÓN A LOS DÍAS DE LA SEMANA

En ésta parte de la metodología se analizó la variación de la concentración de $PM_{2,5}$ con respecto a los días de la semana. Para ello, se hizo uso de la versión de prueba del *software* estadístico Minitab 17.

Primero se agruparon todos los datos de concentración obtenidos durante el periodo de monitoreo según los días de la semana en que fueron obtenidos; de este modo se obtuvieron 10 datos de concentración de $PM_{2,5}$ por cada día de la semana (7 grupos de 10 diez datos cada uno). Después se aplicó la prueba de normalidad de Anderson Darling a cada grupo de datos con la finalidad de determinar si estos tenían distribución normal. Luego, se procedió a utilizar la prueba estadística homogeneidad de varianzas para comprobar que los siete grupos de datos tenían varianzas iguales. Luego, se utilizó la prueba estadística ANOVA de un solo factor para determinar si existió diferencia significativa entre los grupos de datos de concentración de $PM_{2,5}$, obtenidos de la agrupación según el día de la semana en que se obtuvieron, por medio de la comparación de sus medias poblacionales, y por ende ver si en todos los puntos de monitoreo existe una tendencia o patrón común de comportamiento de las concentraciones de $PM_{2,5}$ en todos los días de la semana. Por otra parte, también se utilizaron gráficos de líneas de tendencias con la finalidad de complementar el análisis.

3.2.3. DETERMINACIÓN DE LA VARIACIÓN ESPACIAL DE LA CONCENTRACIÓN DE PM_{2,5} EN EL AIRE

Ésta parte de la metodología explica los procedimientos que se siguieron para cumplir el quinto objetivo específico de la presente investigación.

3.2.3.1. COMPORTAMIENTO DE LA CONCENTRACIÓN DE PM_{2,5} EN RELACIÓN A LOS PUNTOS DE MONITOREO

Para el análisis del comportamiento de la concentración de PM_{2,5} en relación a los puntos de monitoreo se consideró necesario determinar si las concentraciones de PM_{2,5} registradas en cada punto de monitoreo fueron similares o diferentes. Para ello se utilizó la versión de prueba del *software* estadístico Minitab 17.

Primero se agruparon las concentraciones de PM_{2,5}, obtenidas durante el periodo de monitoreo, según el punto de monitoreo en el que fueron obtenidas. De este modo se obtuvieron 5 grupos de 14 datos de concentración de PM_{2,5} (1 grupo por cada punto de monitoreo). Después, se utilizó la prueba de normalidad Anderson Darling para determinar si cada grupo de datos de concentración de PM_{2,5} tenía distribución normal. Luego, se utilizó la prueba estadística no paramétrica Kruskal Wallis para determinar si existió diferencia significativa entre los grupos de datos de concentración de PM_{2,5}, por medio de una comparación de sus medianas poblacionales; y por ende comprobar si las concentraciones de PM_{2,5}, registradas durante el periodo de monitoreo, son significativamente similares o diferentes en todos los puntos de monitoreo.

Por otra parte, también se generaron gráficos de cajas y bigotes (utilizando la versión de prueba del *software* Minitab 17) con la finalidad comprender la distribución de los datos de concentración de PM_{2,5} por punto de monitoreo.

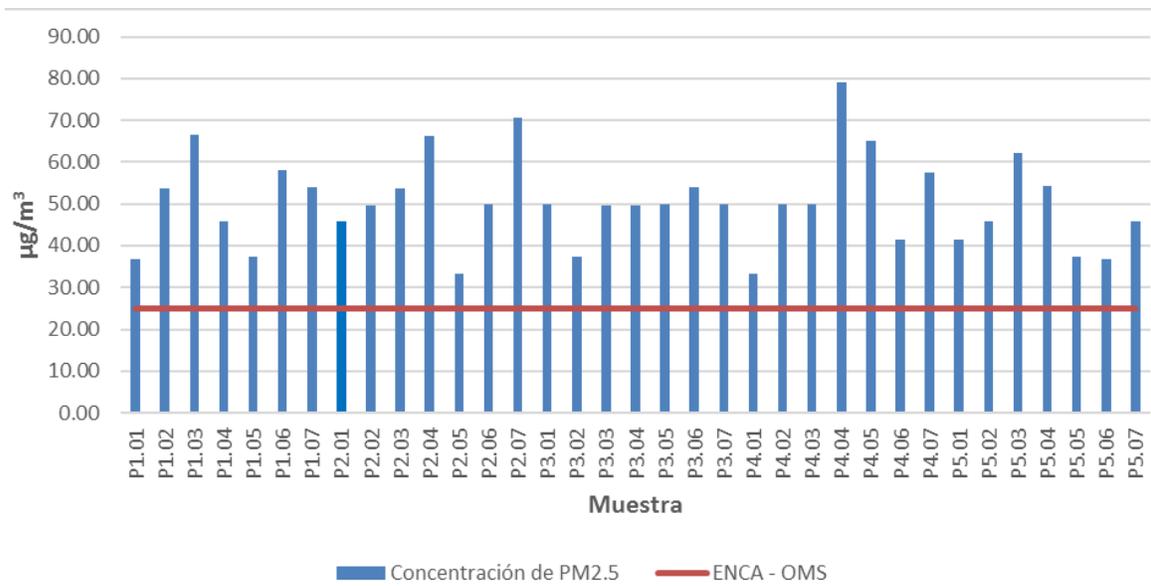
3.2.3.2. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA CONCENTRACIÓN DE PM_{2,5} EN EL CAMPUS DE LA UNALM

En ésta sección de la metodología se representó gráficamente la distribución de la concentración de PM_{2,5} en el campus, por medio de un mapa donde se visualizan isolíneas de concentración de PM_{2,5}. También se representó gráficamente la distribución de la concentración de PM_{2,5} en el campus durante el periodo de invierno y primavera. Para construir dicho mapa de isolíneas de concentración se hizo uso de la versión de prueba del *software* ArcGis 10.2.

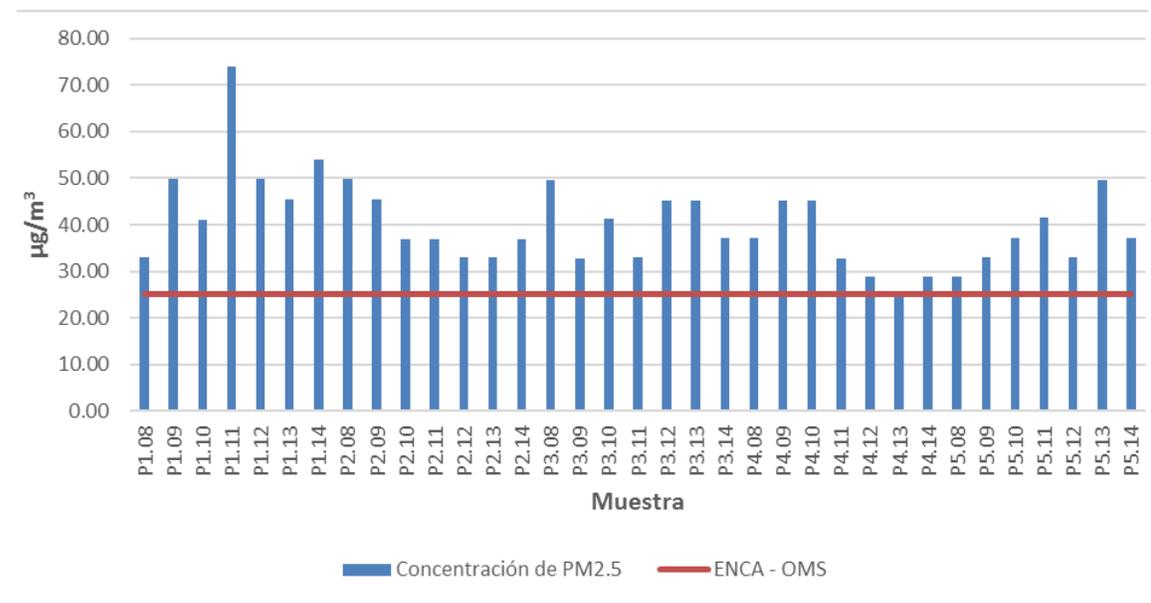
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. MEDICIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE PM_{2,5} EN EL AIRE

Las figuras 9a y 9b muestran las concentraciones de PM_{2,5} obtenidas durante el periodo de monitoreo (04 de julio – 19 noviembre) en los cinco diferentes puntos de monitoreo; cada una de ellas se encuentra identificada por su código de muestra. Se puede observar que casi todas las concentraciones registradas, menos una (muestra P4.13), superan el Estándar Nacional de Calidad Ambiental (ENCA) y el Valor Guía de la Organización Mundial de la Salud (OMS) para PM_{2,5}, siendo la concentración promedio del campus 45.24 µg/m³. Asimismo, se observa que los valores de concentración de PM_{2,5} son variados y no se presentan repeticiones (no hay dos valores iguales). Por otro lado, se debe mencionar que todos los datos colectados aprobaron el proceso de validación de datos; es decir, ningún filtro se encontró deteriorado al finalizar la colección de muestra y en ningún caso el tiempo de muestreo fue diferente de 24 ± 1 horas, lo cual se debió al sumo cuidado con que se manipuló el equipo muestreador y los filtros colectores de muestra.



(a)



(b)

Figura 9. Concentraciones de PM_{2,5} en el aire ambiental de la UNALM durante el periodo de monitoreo, identificadas por código de muestra. FUENTE: Elaboración propia.

Al observarse valores variados de concentración de $PM_{2,5}$ se comprueba que la concentración de este contaminante es dinámica; es decir, no se mantiene constante en el tiempo y espacio (no hay dos valores exactamente iguales), lo cual es soportado por estudios sobre variación temporal y espacial de la concentración de material particulado realizados por Ibañez (2008), Massoud et al (2011) Candanoza et al. (2013), Silva et al. (2013) y Hu et al. (2014) en el distrito El Agustino (Lima, Perú), en Beirut (Líbano), en el área urbana de Santiago de Cali (Colombia), en la ciudad de Santa Marta (Colombia), y en la llanura norte de China y delta del río Yangtze (China), respectivamente. Más adelante se discute a detalle lo que representa la magnitud de los valores de concentración y la variación de estos; en esta sección se pretende mostrar sólo el resultado del proceso de muestreo y medición del $PM_{2,5}$ en el aire.

4.2. DETERMINACIÓN DE LA VARIACIÓN TEMPORAL DE LA CONCENTRACIÓN DE $PM_{2,5}$ EN EL AIRE

4.2.1. VARIACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE $PM_{2,5}$ POR CICLO DE MONITOREO

a) Diferencia o igualdad de los grupos de concentración de $PM_{2,5}$ obtenidas en invierno y primavera

La Tabla 8 muestra la forma en que se agruparon los datos de concentración de $PM_{2,5}$ para procesarlos en la versión de prueba del *software* estadístico Minitab 17. Los datos fueron agrupados según la estación del año en que fueron obtenidos (invierno o primavera), por cada punto de monitoreo, lo cual a su vez representa una agrupación según el ciclo de monitoreo en que fueron obtenidos..

Tabla 8. Concentraciones de PM_{2,5} (µg/m³) por punto de monitoreo, agrupadas por estación del año en que se obtuvieron.

P1		P2		P3		P4		P5	
Invierno	Primavera								
36.85	32.92	45.72	49.89	49.93	49.53	33.18	37.05	41.46	28.80
53.74	49.92	49.75	45.44	37.35	32.83	49.78	45.14	45.79	32.90
66.44	40.95	53.66	36.99	49.74	41.32	49.90	45.07	62.29	37.07
45.75	73.85	66.34	36.90	49.69	32.95	79.16	32.87	54.13	41.44
37.47	49.91	33.24	32.88	49.82	45.17	65.15	28.77	37.32	32.95
58.11	45.33	49.92	32.93	53.90	45.15	41.52	24.67	36.76	49.70
53.94	54.11	70.71	36.89	49.81	37.10	57.46	28.88	45.74	37.24
Promedio									
50.33	49.57	52.76	38.85	48.61	40.58	53.73	34.64	46.21	37.16

FUENTE: Elaboración propia

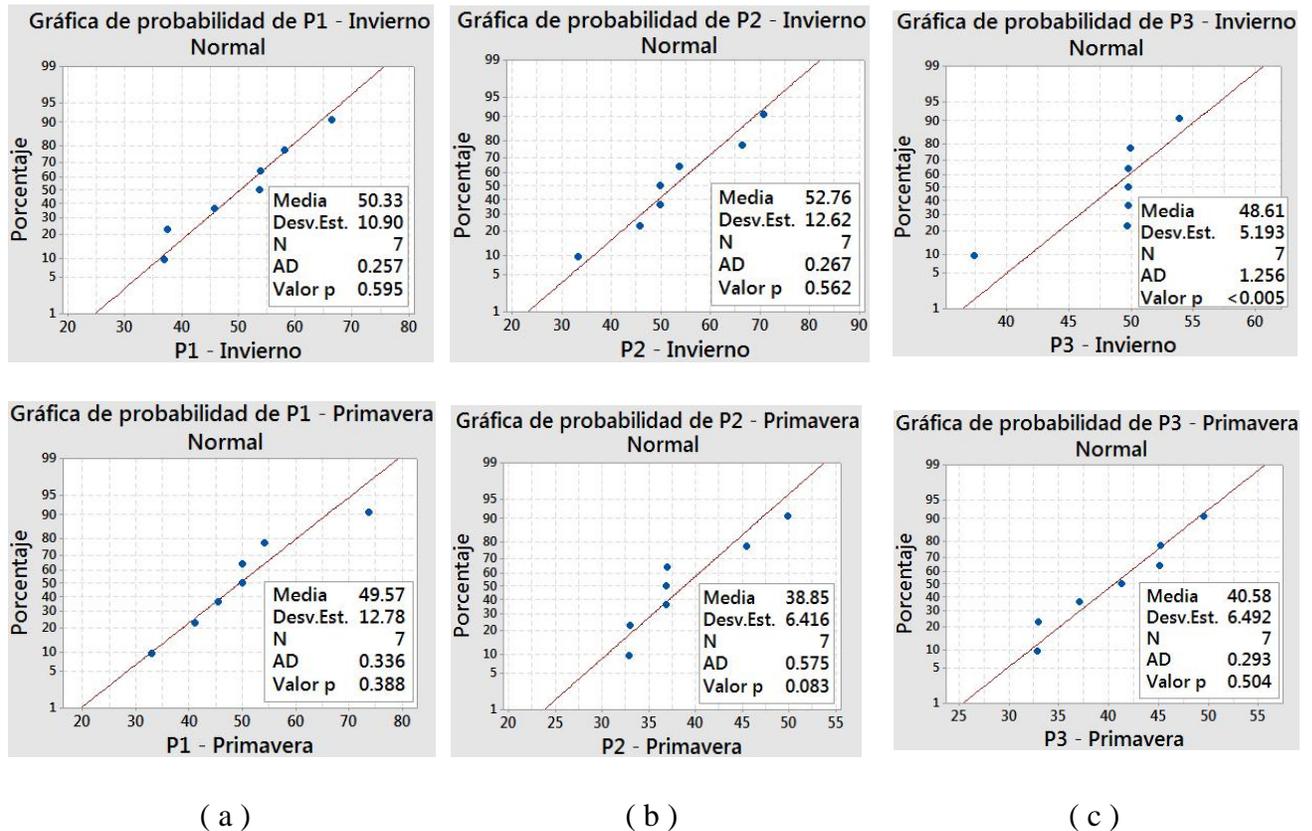
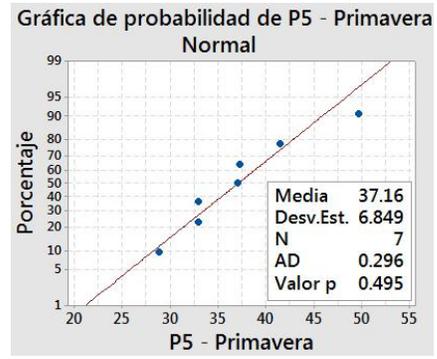
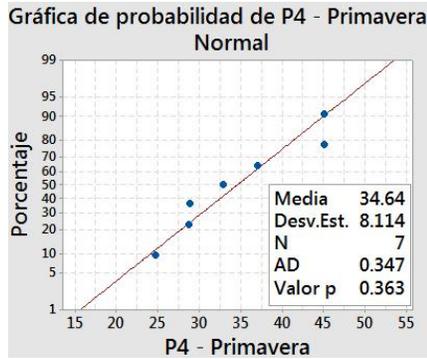
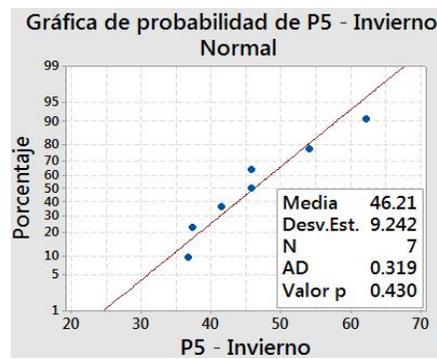
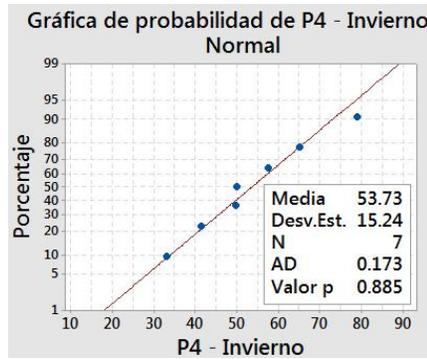


Figura 10. Resultado de la prueba estadística Anderson Darling aplicada a los grupos de datos de concentración de PM_{2,5} obtenidos en invierno y primavera en los puntos de monitoreo P1 (a), P2 (b) y P3 (c). FUENTE: Elaboración propia.



(d)

(e)

Figura 11. Resultado de la prueba estadística Anderson Darling aplicada a los grupos de datos de concentración de $PM_{2.5}$ obtenidos en invierno y primavera en los puntos de monitoreo P4 (d) y P5 (e). FUENTE: Elaboración propia.

En la Figura 10 y Figura 11 se observa los resultados de la aplicación de la prueba de normalidad Anderson Darling sobre los grupos de datos de concentración de $PM_{2.5}$ obtenidos en invierno y los obtenidos en primavera, por cada punto de monitoreo. Las Figuras 10a, 10b, 11d y 11e muestran que en los puntos P1, P2, P4 y P5, los grupos de datos de concentración de $PM_{2.5}$ obtenidos en invierno presentan un valor p (0.595, 0.562, 0.885 y 0.430 respectivamente) mayor al nivel de significación ($\alpha = 0.05$), igual que los grupos de datos obtenidos primavera (con valores p de 0.388, 0.083, 0.363 y 0.495 respectivamente). Por lo tanto, según la Tabla 5 (Pag. 44), los grupos de datos de concentración de $PM_{2.5}$ obtenidos en invierno y los obtenidos en primavera siguen una distribución normal, en los puntos P1, P2, P4 y P5; asimismo esto se sustenta al observar que en las concentraciones de invierno y primavera respectivas se ajustan a la línea de distribución normal (línea roja). Por otro lado, En la Figura 10c se observa que en el punto P3 el grupo de datos de concentración de $PM_{2.5}$ obtenidos en invierno presenta un valor p

menor al nivel de significación ($0.005 \leq 0.05$) mientras que el grupo de datos obtenidos en primavera presenta un valor p mayor al nivel de significación ($0.504 > 0.05$) lo cual, según la Tabla 5, indica que el grupo de datos de invierno no sigue una distribución normal pero el grupo de datos de primavera sí; asimismo esto se sustenta al observar que las concentraciones de invierno no se ajustan a la línea de distribución normal (línea roja), mientras que las concentraciones de primavera sí.

Tabla 9. Valores p resultantes de la aplicación de las pruebas estadísticas homogeneidad de varianzas, t en dos muestras y U de Mann Whitney

PUNTO	Pruebas Estadísticas		
	Homogeneidad de Varianzas	Prueba t en dos muestras	Prueba U de Mann Whitney
	valor p	valor p	valor p
P1	0.709	0.907	-
P2	0.124	0.023	-
P3	-	-	0.0106
P4	0.151	0.013	-
P5	0.485	0.059	-

FUENTE: Elaboración propia

En la Tabla 9 se observan los valores p de las pruebas estadísticas utilizadas para comparar los grupos de datos de invierno y primavera, por cada grupo de monitoreo. Según esta tabla y la Tabla 5, en los puntos P1, P2, P4 y P5 existe homogeneidad de varianzas entre sus grupos de datos de concentración de $PM_{2.5}$ de invierno y de primavera (la varianza del grupo de invierno no es diferente a la varianza del grupo de primavera), ya que los valores p obtenidos de la aplicación de la prueba de homogeneidad de varianzas en dichos puntos (0.709, 0.124, 0.151 y 0.485 respectivamente) son mayores al nivel de significación ($\alpha = 0.05$) de dicha prueba.

Por lo tanto, se cumplen los requisitos (distribución normal y varianzas iguales) para utilizar la prueba t en dos muestras con la finalidad comparar la media poblacional del grupo de concentraciones de PM_{2,5} de invierno con la del grupo de primavera para determinar si existe diferencia significativa entre ambos grupos de concentraciones, en los puntos de monitoreo P1, P2, P4 y P5. Por otro lado, para el punto P3 se utilizó la prueba U de Mann Whitney para determinar si hay diferencia significativa entre los grupos de concentraciones de invierno y primavera por medio de una comparación de sus medianas poblacionales; ello debido a que en este punto sólo el grupo de concentraciones de primavera presenta distribución normal mas no el grupo de invierno lo cual indica, según la Tabla 5, que no se cumple con los requisitos necesarios para aplicar la prueba t en dos muestras en este punto.

Así, la Tabla 9 muestra que en los puntos P1 y P5 el valor p obtenido de la prueba paramétrica t en dos muestras (0.907 y 0.059 respectivamente) es mayor al nivel de significación utilizado en dicha prueba ($\alpha = 0.05$) lo cual, según la Tabla 5, indica que no existe evidencia estadística suficiente para decir que las medias poblacionales del grupo de concentraciones de invierno y primavera son diferentes en dichos puntos; por lo tanto, se puede decir que tal vez las concentraciones de PM_{2,5} en los puntos P1 y P5 no cambiaron significativamente durante el cambio de estación (de invierno a primavera). En cambio, en los puntos P2 y P4 ocurre lo contrario, el valor p obtenido de la prueba t en dos muestras (0.023 y 0.013 respectivamente) es menor al nivel de significación ($\alpha = 0.05$) e indica que existe evidencia estadística suficiente para afirmar que las medias poblacionales del grupo de concentraciones de invierno y primavera son diferentes; por lo tanto, se puede decir que es posible que las concentraciones de PM_{2,5} en los puntos P2 y P4 cambiaron significativamente durante el cambio de estación (de invierno a primavera). En el caso del punto P3, el valor p obtenido de la prueba no paramétrica U de Mann Whitney es menor al nivel de significación utilizado en dicha prueba ($0.0106 \leq 0.05$) lo cual, según la Tabla 5, indica que existe evidencia estadística suficiente para decir que las medianas poblacionales del grupo de concentraciones de invierno y primavera son diferentes; por lo tanto, se puede decir que es probable que las concentraciones de PM_{2,5} en el punto P3 cambiaron significativamente durante el cambio de estación (de invierno a primavera).

Del párrafo anterior se evidencia que no en todos los puntos de monitoreo hubo cambios significativos en la concentración de $PM_{2.5}$ durante el cambio de estación (de invierno a primavera). Es decir, los resultados no fueron homogéneos, lo cual sugiere que existieron factores que influyeron sobre la concentración de $PM_{2.5}$ e impidieron obtener un resultado homogéneo para todos los puntos. Por ejemplo, un factor pudo ser la circulación de vehículos en la avenida La Molina (a la altura que esta colinda con la UNALM) para el caso del punto P1, ya que éste punto es el que más próximo se encuentra a dicha avenida, cuyo tránsito constante de vehículos particulares, de transporte público y de carga pesada (siendo estos una fuente de $PM_{2.5}$ debido a la quema de combustible fósil) pudo causar que una parte significativa del $PM_{2.5}$ colectado en el punto P1 provenga de las emisiones vehiculares las cuales se liberan a la atmósfera constantemente, pues la avenida La Molina es transitada por vehículos casi a un ritmo homogéneo durante todo el año, lo cual pudo favorecer a que las cantidades de material particulado fino colectadas en cada muestra del punto P1 sean similares y por ende las concentraciones del mismo también.

Adicionalmente, éstos resultados de la variación de la concentración de $PM_{2.5}$ de invierno a primavera se pueden comparar con los resultados obtenidos por He et al. (2001) y Ye et al. (2002) después de realizar un estudio acerca de las características y comportamiento estacional del $PM_{2.5}$ en las ciudades de Shanghai y Beijing (China), ambos en el periodo 1999-2000, los cuales determinaron que la diferencia significativa entre las concentraciones de $PM_{2.5}$ de invierno y las de primavera se debía a que en la temporada de invierno, respecto a la de primavera, se quemaba más carbón y biomasa en las viviendas con la finalidad de obtener calefacción y poder cocinar, por lo cual concluyeron que la quema de carbón y biomasa para fines domésticos fue un factor muy influyente en la variación estacional de las concentraciones de material particulado fino. Sin embargo, para el caso de la presente investigación, en el campus de la UNALM no se aplican mecanismos similares con la finalidad de atenuar los efectos del invierno y, en general, las actividades realizadas por la comunidad universitaria no suele cambiar significativamente por el cambio de estación, lo cual sugiere que los cambios estacionales en las concentraciones de $PM_{2.5}$ registradas en los puntos P2, P3 y P4 se hayan visto

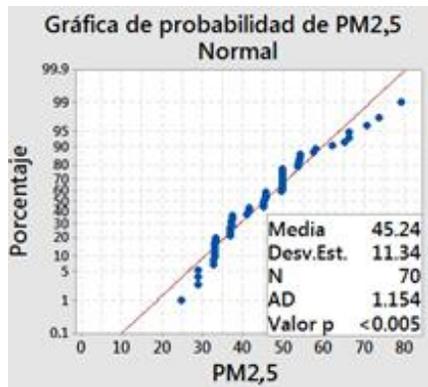
influenciadas mayoritariamente por el cambio de las condiciones meteorológicas o climáticas causados por el cambio de estación, que por patrones de conducta de la comunidad universitaria.

Por lo tanto, el hecho que la mayoría (más de la mitad) de puntos de monitoreo presenten cambios significativos en las concentraciones de $PM_{2.5}$, durante el cambio de estación, puede ser un indicio de que la concentración de $PM_{2.5}$ varía significativamente durante el cambio de estación (de invierno a primavera) en el campus de la UNALM.

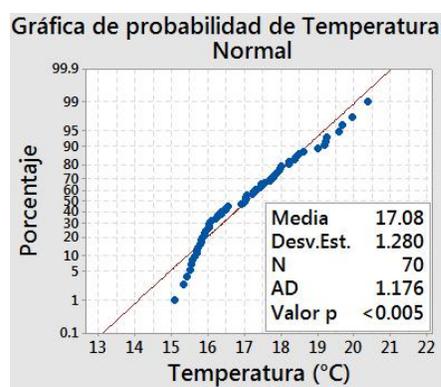
En el Anexo 3, se muestran los cálculos estadísticos realizados en Minitab 17 para esta sección.

b) Determinación de la correlación entre valores de concentración de $PM_{2.5}$ y valores de variables meteorológicas temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y radiación solar

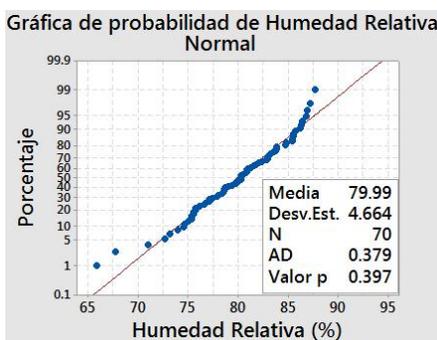
En la Figura 12 se observa los resultados de la aplicación de la prueba de normalidad Anderson Darling en los grupos de datos de concentración de $PM_{2.5}$, temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y radiación solar, obtenidos durante el periodo de monitoreo. Las Figuras 12a y 12b, en concordancia con la Tabla 5 (Pag. 44), muestran que los datos de concentración de $PM_{2.5}$ y temperatura no presentan distribución normal debido a que los valores p obtenidos (<0.005 y <0.005 respectivamente) son menores al nivel de significación de la prueba ($\alpha = 0.01$); asimismo esto se sustenta al observar que los datos no se ajustan a la línea de distribución normal (línea roja) en las figuras respectivas. Por el contrario, las Figuras 12c, 12d y 12e muestran que los datos de humedad relativa, velocidad del viento y radiación solar presentan distribución normal ya que los valores p obtenidos (0.397, 0.228 y 0.033 respectivamente) son mayores al nivel de significación de la prueba ($\alpha = 0.01$); asimismo esto se sustenta al observar que los datos se ajustan a la línea de distribución normal (línea roja) en las figuras respectivas.



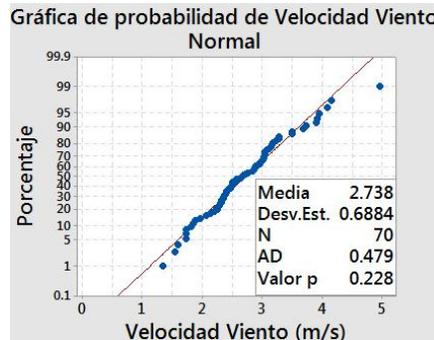
(a)



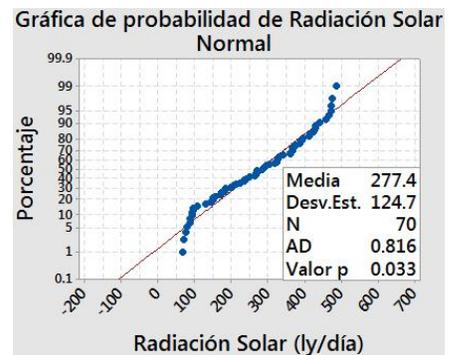
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 12. Resultado de la prueba estadística Anderson Darling utilizada sobre el grupo de concentraciones de $PM_{2,5}$ (a), grupo de valores de temperatura (b), humedad relativa (c), velocidad del viento (d) y radiación solar (e), obtenidos durante el periodo de monitoreo.

FUENTE: Elaboración propia.

Debido a que los datos de concentración de $PM_{2,5}$ no tienen distribución normal, los coeficientes de correlación entre la concentración de $PM_{2,5}$ y las variables meteorológicas temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y radiación solar se calcularon por utilizando la prueba no paramétrica Correlación de Spearman, ya que en ningún caso hubo una pareja (concentración de $PM_{2,5}$ y variable meteorológica) en que ambas variables presenten datos con distribución normal.

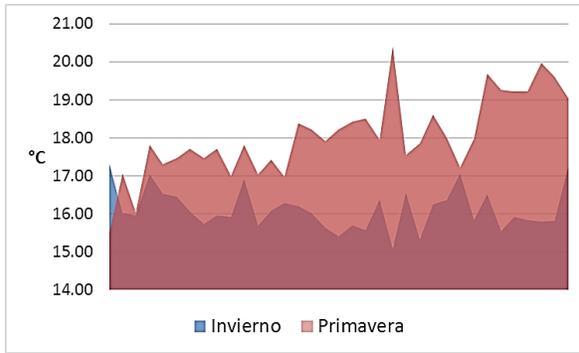
Tabla 10. Coeficientes de correlación de Spearman (r) y valor p respectivo resultantes de la aplicación de la prueba correlación de Spearman entre las concentraciones de PM_{2,5} y los valores de las variables meteorológicas temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y radiación solar.

Variable Meteorológica	r	Valor p
Temperatura	-0.401	0.001
Humedad Relativa	0.474	0.000
Velocidad del Viento	-0.573	0.000
Radiación Solar	-0.339	0.004

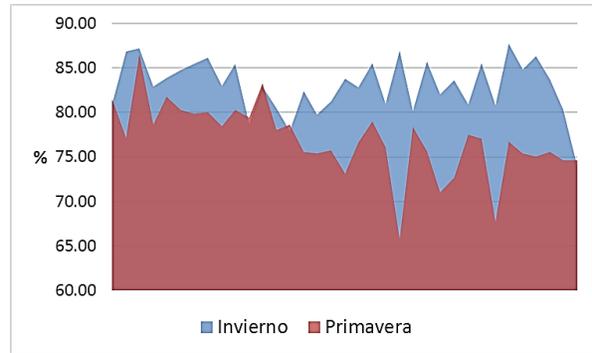
FUENTE: Elaboración propia.

La Tabla 10 muestra los resultados obtenidos de la aplicación de la prueba Correlación de Spearman entre los datos de concentración de PM_{2,5} y temperatura, concentración de PM_{2,5} y humedad relativa, concentración de PM_{2,5} y velocidad del viento, y concentración de PM_{2,5} y radiación solar. En dicha tabla se observa que los valores p obtenidos (0.001, 0.000, 0.000 y 0.004 respectivamente) son menores al nivel de significación de la prueba ($\alpha = 0.01$) lo cual indica, según la Tabla 5, que existe evidencia estadística suficiente para afirmar que los coeficientes de correlación (r) son significativos; es decir, la relación entre el PM_{2,5} y dichas variables meteorológicas existe y el valor de los coeficientes de correlación no es una consecuencia del azar.

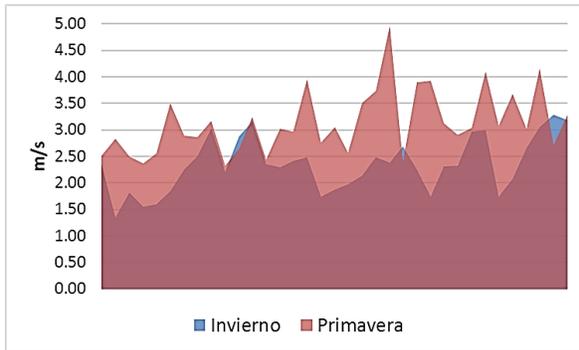
Asimismo, de la Tabla 10 se observa que existe una relación negativa media entre el PM_{2,5} y la temperatura, velocidad del viento y radiación solar, con valores de coeficientes de correlación de -0.401, -0.573 y -0.339 respectivamente, y una relación positiva media con la humedad relativa con coeficiente de correlación de valor 0.474. Estos resultados sugieren que durante el periodo frío, más húmedo, con menos viento y menor radiación solar, las concentraciones de PM_{2,5} tendieron a aumentar o ser mayores en el campus del a UNALM.



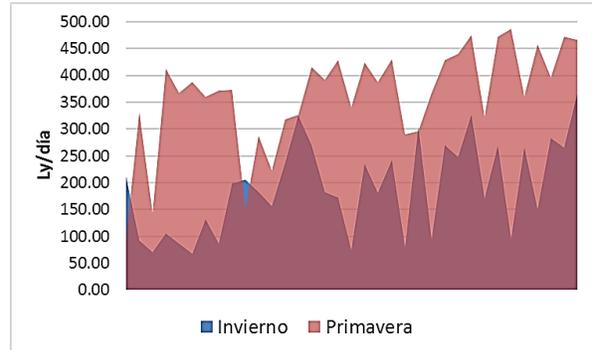
(a)



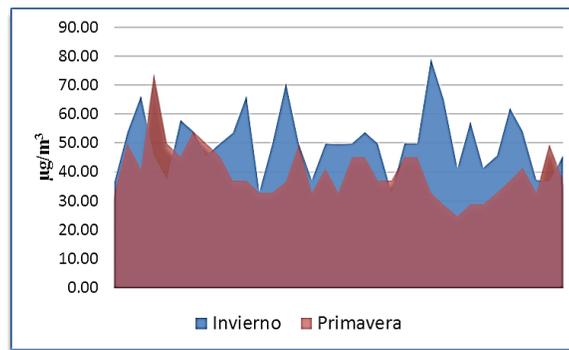
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 13. Tendencia de la temperatura (a), humedad relativa (b), velocidad del viento (c), radiación solar (d) y concentración de PM_{2,5} (e), durante el periodo de monitoreo.

FUENTE: Elaboración propia.

Las Figuras 13a, 13b, 13c, 13d y 13e muestran la tendencia de la temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, radiación solar y concentración de $PM_{2,5}$, respectivamente, en los periodos de invierno y primavera. Asimismo, esta figura muestra que el periodo frío, más húmedo, con vientos menos veloces y menor radiación solar en que se obtuvieron las concentraciones más altas de $PM_{2,5}$ fue el periodo de invierno; lo cual concuerda con Pacsi (2016), quien realizó un análisis temporal y espacial de la calidad del aire determinado por material particulado (PM_{10} y $PM_{2,5}$) en Lima metropolitana durante el periodo 2001 - 2014, que determinó que las concentraciones de $PM_{2,5}$ en Lima metropolitana y el Callao durante el invierno son mayores que en primavera. Esto de algún modo se comprueba al ver que las concentraciones promedio de invierno y primavera fueron de 50.33 y 40.16 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente, siendo la primera mayor que la segunda.

Por otra parte, de la Tabla 10 y Figuras 13c y 13e además se puede decir que, al existir una relación media negativa entre la concentración de $PM_{2,5}$ y la velocidad del viento, en el campus de la UNALM, puede que el viento disipe el material particulado mientras más velocidad tiene, en lugar de acumularlo; este efecto disipador del viento se vería favorecido con la distancia que hay entre la UNALM y los cerros del distrito, la cual es considerable y por ende evita que estos funcionen como barrera que impide la disipación del $PM_{2,5}$ en el campus.



Figura 14. Representación gráfica de la ubicación del campus de la UNALM respecto a los cerros del distrito La Molina y de la dirección predominante del viento durante el periodo de monitoreo. FUENTE: Elaboración propia usando mapas de Google Earth.

En la Figura 14 se puede apreciar la distancia considerable que hay entre la UNALM y los cerros del distrito. A la vez, se observa que la dirección del viento que predominó durante el periodo de monitoreo fue de sur oeste, lo cual indica que las veces en que el viento disipó el $PM_{2.5}$ del campus probablemente lo transportó y acumuló en las urbanizaciones El Mástil de la Laguna y La Planicie, ya que allí tal vez los cerros del distrito ejercen su efecto de barrera al paso del viento. Para representar gráficamente la dirección del viento se utilizó el *software* WRPLOT.

Del mismo modo, a partir de la Tabla 10 y Figuras 13a, 13b y 13c se puede decir que es posible durante el periodo de invierno una parte significativa del $PM_{2.5}$ secundario provino principalmente de reacciones químicas del SO_2 y NO_x en la atmósfera (los cuales probablemente fueron emitidos por vehículos que transitan por la avenida La Molina y Raúl Ferrero) ya que, al tener el $PM_{2.5}$ relación negativa media con la temperatura y relación positiva

media con la humedad, concuerda con lo que mencionan Ibañez (2008) y Kulshrestha et al. (2009), de que una atmósfera en condiciones de baja temperatura y alta humedad relativa crea un medio en el que se favorecen las reacciones químicas entre gases contaminantes precursores (SO_2 y NO_x) para formar $\text{PM}_{2.5}$. De la Tabla 10 y Figuras 13d y 13e, además, se puede decir que, al existir relación media negativa entre la variable radiación solar y la concentración de $\text{PM}_{2.5}$, puede que durante el periodo de invierno en el campus de la UNALM la formación material particulado fino ($\text{PM}_{2.5}$) secundario a partir de reacciones de oxidación de compuestos orgánicos volátiles (COVs) en la atmósfera sea poca o insignificante, ya que según Santiago (2013) estas reacciones se ven favorecidas con la presencia de luz solar (en días con mayor radiación solar); sin embargo, los resultados evidencian lo contrario. Esto a la vez puede ser indicio de que los componentes orgánicos del $\text{PM}_{2.5}$ secundario, formado en el campus, representan una fracción poco significativa del mismo. Sin embargo, es necesario realizar un estudio sobre composición química del $\text{PM}_{2.5}$ para confirmar por completo dichas suposiciones.

Acerca de otros estudios en que también se calcularon coeficientes de correlación entre la concentración de material particulado y variables meteorológicas, Palacio et al. (2014) quienes realizaron un estudio de la calidad del aire en la localidad de Puente Aranda (Bogotá, Colombia) en el 2009, obtuvieron coeficientes de correlación del material particulado con la temperatura, velocidad del viento y radiación solar de 0.58, 0.52 y 0.53 respectivamente, los cuales son similares en valor a los coeficientes obtenidos en la presente investigación y también denotan una relación media entre el material particulado y las variables meteorológicas mencionadas; sin embargo, a diferencia de la presente investigación, Palacio et al. (2014) obtuvieron coeficientes positivos, los cuales denotan relaciones positivas. Según Palacio et al. (2014), sus resultados sugieren que las concentraciones de material particulado tienden a aumentar en invierno (periodo sin lluvias en Bogotá), al igual que la presente investigación, lo cual concuerda con Pacsi (2016) al mencionar que las características geomorfológicas, urbanísticas y meteorológicas, junto con las fuentes de emisiones, determinan la variación temporal de la concentración de material particulado.

En el Anexo 4, se muestran los cálculos estadísticos realizados en Minitab 17 para esta sección.

4.2.2. VARIACIÓN DIARIA DE LA CONCENTRACIÓN DE PM_{2,5}

a) Número de veces que superan el valor del Estándar Nacional de Calidad Ambiental del Aire y el Valor Guía de la Organización Mundial de la Salud para PM_{2,5}

La Figura 15 muestra las concentraciones de PM_{2,5} diarias obtenidas durante el periodo de monitoreo, según el día en que se realizó la toma de muestra. De esta figura se puede observar que 69 de los 70 días monitoreados presentan concentraciones de PM_{2,5} que superan el valor del Estándar Nacional de Calidad Ambiental (25 µg/m³) y el Valor Guía de la Organización Mundial de la Salud (25 µg/m³), lo cual representa al 98.6% de los días monitoreados. Asimismo, en la Figura 16 se observa que las concentraciones de PM_{2,5} obtenidas tienden a oscilar entre valores que van de 36.89 a 42.92 µg/m³, con un valor máximo de 79.16 µg/m³ y un valor mínimo de 24.67 µg/m³, los cuales fueron obtenidos el 21 de agosto y 03 de noviembre del 2016, respectivamente.

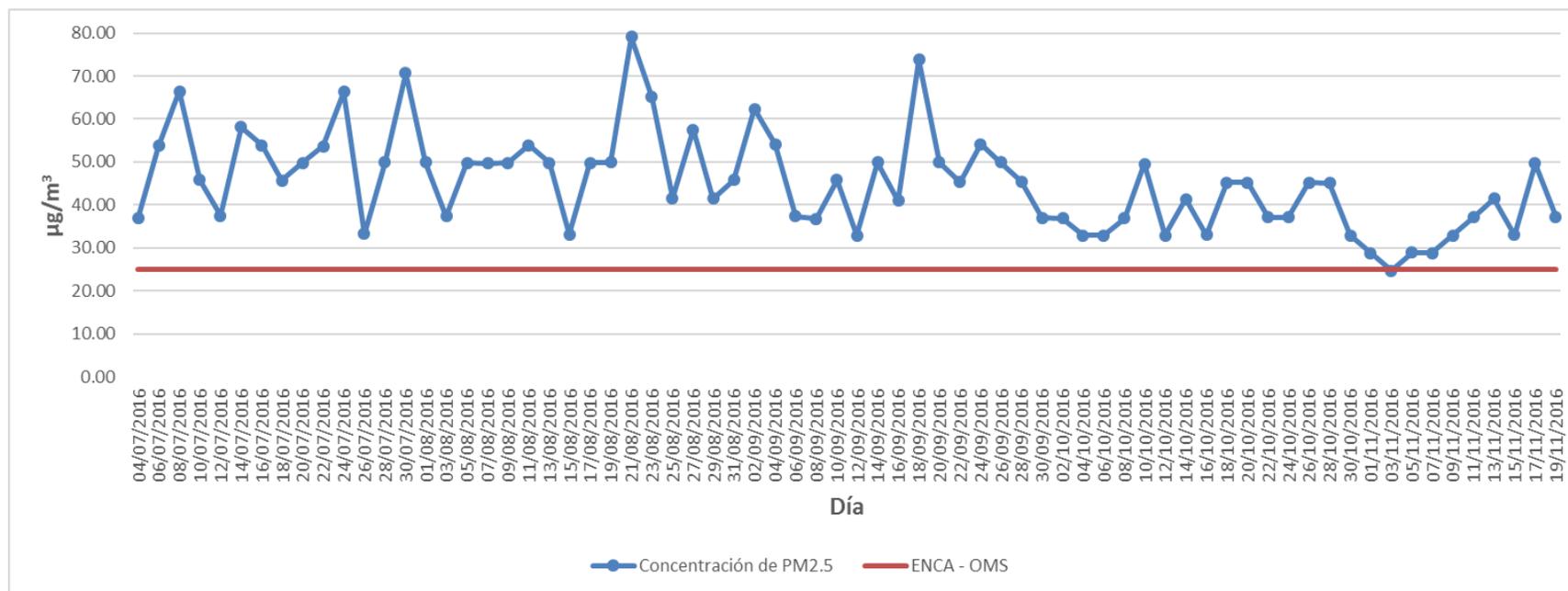


Figura 15. Concentraciones de PM_{2.5} en el aire ambiental de la UNALM durante el periodo de monitoreo (04 julio – 19 noviembre). FUENTE: Elaboración propia.

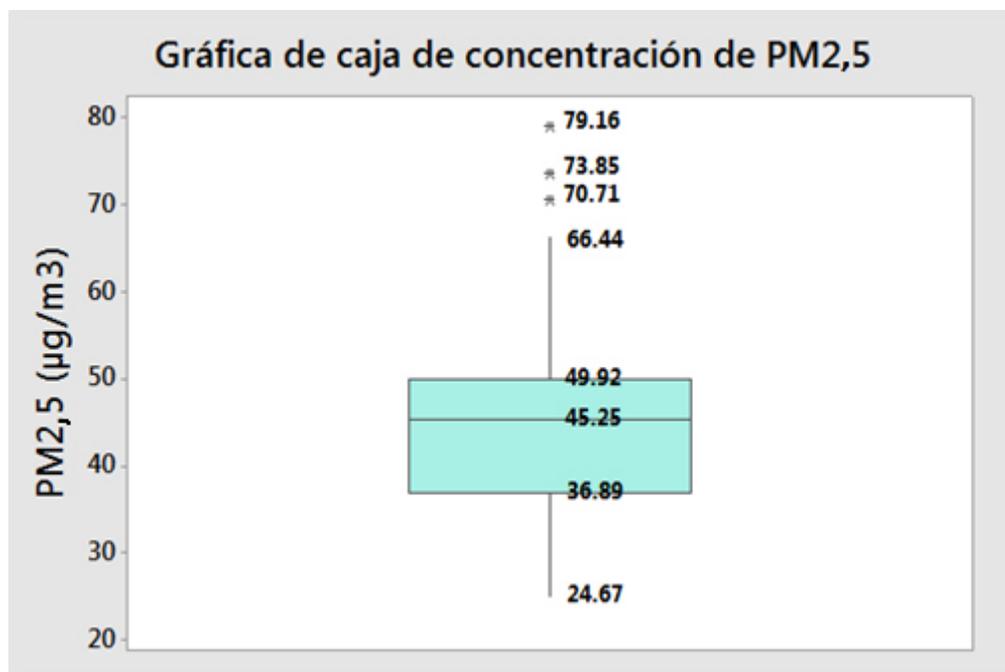


Figura 16. Distribución de los valores de concentración de PM_{2,5} obtenidos durante el periodo de monitoreo (04 julio – 19 noviembre) representada en un gráfico de cajas.

FUENTE: Elaboración propia.

Estos resultados concuerdan con los obtenidos por SENAMHI que, a través de los boletines mensuales sobre la vigilancia de la calidad del aire en Lima Metropolitana correspondientes a los meses de julio, agosto, setiembre, octubre y noviembre del año 2016 (SENAMHI 2016a, SENAMHI 2016b, SENAMHI 2016c, SENAMHI 2016d, SENAMHI 2016e), muestra que en dichos meses (los cuales coinciden con el periodo de monitoreo) la zona Lima Este presentó valores de concentración de PM_{2,5} que superan el ENCA y el valor guía de la OMS, los cuales van de 27 a 59.1 µg/m³, siendo este rango mayor pero similar al que se encontró en la presente investigación (36.89 a 42.92 µg/m³) ya que ambos abarcan valores similares de concentración; lo cual tal vez se debe a que el distrito La Molina, y por ende la UNALM, se encuentran dentro de la Zona Este. Se debe mencionar que las estaciones de SENAMHI de la zona Lima Este son cuatro y se ubican en las azoteas de las municipalidades de los distritos de Santa Anita, Ate, Huachipa y en la azotea de la sede de la Universidad Cesar Vallejo del distrito San Juan de Lurigancho; sin embargo para la presente investigación, se consideraron a las estaciones de Santa Anita y Ate como representantes de la zona Lima Este debido a que son las más cercanas

al campus de la UNALM, es decir, los datos provenientes de los boletines mensuales del SENAMHI corresponden a esas dos estaciones. Asimismo, SENAMHI muestra que, en sus estaciones de la zona Lima Este (de los distritos Santa Anita y Ate), el porcentaje de días monitoreados que superan el ENCA y valor guía de la OMS va de 48.4 a 61.8% aproximadamente, los cuales son menores al porcentaje obtenido en la presente investigación (98.6%); y probablemente esta diferencia se deba a que en dichas estaciones de monitoreo de la calidad del aire de SENAMHI no se registraron valores de concentración de $PM_{2,5}$ de manera consecutiva, pasando periodos sin registrar datos de concentración de $PM_{2,5}$, debido a fallas en los equipos de monitoreo y por la falta de recursos necesarios para llevar a cabo el monitoreo de la calidad del aire y publicación de datos (como energía eléctrica y conexión a internet), lo cual hace que se omitan registros en varios días en que se superó la concentración de $PM_{2,5}$ y con ello, puede que el porcentaje de días monitoreados en que se supera el ENCA y valor guía de la OMS resulte menor del que debió ser si se hubiese tomado datos ininterrumpidamente (sin omisiones). Además, se debe mencionar que el SENAMHI utiliza equipos automáticos (microbalanza oscilatoria) para el registro de la concentración de $PM_{2,5}$ los cuales suelen registrar valores de concentración de $PM_{2,5}$ menores a las que registra un equipo muestreador de bajo volumen, según un estudio realizado por Ibañez (2008); lo cual también puede ser una explicación a las menores concentraciones de $PM_{2,5}$ registradas por SENAMHI, y por ende al menor porcentaje de días monitoreados que superan el ENCA y valor guía de la OMS en la zona Lima Este, respecto al registrado en la presente investigación.

Tabla 11. Porcentaje excedido del Estándar Nacional de Calidad Ambiental y Valor Guía de la Organización Mundial de la Salud por día monitoreado, promedio por punto de monitoreo y promedio general.

P1		P2		P3		P4		P5	
Fecha	%	Fecha	%	Fecha	%	Fecha	%	Fecha	%
04/07/2016	47.39	18/07/2016	82.88	01/08/2016	99.71	15/08/2016	32.71	29/08/2016	65.84
06/07/2016	114.96	20/07/2016	99.00	03/08/2016	49.41	17/08/2016	99.10	31/08/2016	83.15
08/07/2016	165.75	22/07/2016	114.66	05/08/2016	98.97	19/08/2016	99.60	02/09/2016	149.14
10/07/2016	83.01	24/07/2016	165.37	07/08/2016	98.76	21/08/2016	216.63	04/09/2016	116.53
12/07/2016	49.88	26/07/2016	32.95	09/08/2016	99.27	23/08/2016	160.62	06/09/2016	49.29
14/07/2016	132.44	28/07/2016	99.69	11/08/2016	115.61	25/08/2016	66.06	08/09/2016	47.05
16/07/2016	115.76	30/07/2016	182.84	13/08/2016	99.25	27/08/2016	129.83	10/09/2016	82.95
12/09/2016	31.67	26/09/2016	99.56	10/10/2016	98.11	24/10/2016	48.20	07/11/2016	15.18
14/09/2016	99.69	28/09/2016	81.74	12/10/2016	31.33	26/10/2016	80.56	09/11/2016	31.59
16/09/2016	63.80	30/09/2016	47.98	14/10/2016	65.27	28/10/2016	80.28	11/11/2016	48.29
18/09/2016	195.41	02/10/2016	47.61	16/10/2016	31.79	30/10/2016	31.49	13/11/2016	65.75
20/09/2016	99.66	04/10/2016	31.51	18/10/2016	80.68	01/11/2016	15.07	15/11/2016	31.82
22/09/2016	81.33	06/10/2016	31.74	20/10/2016	80.59	03/11/2016	0.00	17/11/2016	98.82
24/09/2016	116.45	08/10/2016	47.57	22/10/2016	48.42	05/11/2016	15.51	19/11/2016	48.97
% Excedido promedio por punto de monitoreo									
99.80		83.22		78.37		76.83		66.74	
% Excedido general									
80.99									

FUENTE: Elaboración propia

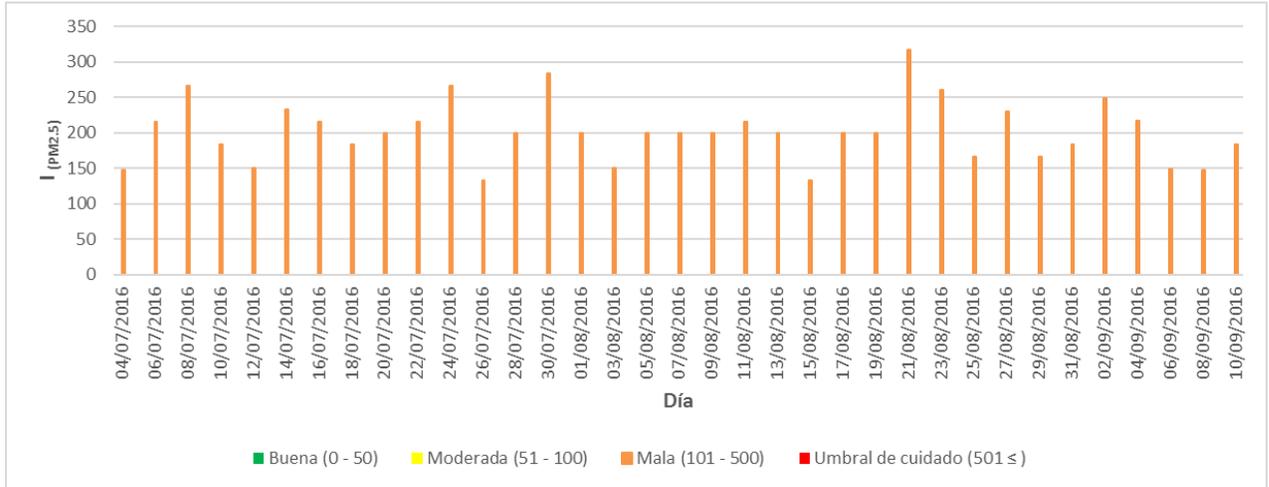
La Tabla 11 muestra los porcentajes diarios con que se excedieron el valor del Estándar Nacional de Calidad Ambiental (ENCA) y al valor guía de la Organización Mundial de la Salud (OMS) para PM_{2,5}, siendo 216.63% y 15.07% el mayor y menor porcentaje con que se excedieron dichos valores, los cuales se registraron el día 21 de agosto del 2016 (día que presentó la concentración más alta de PM_{2,5}) y el 01 de noviembre del 2016, respectivamente. De la misma tabla también se observa que el valor del ENCA y valor guía de la OMS se excedieron en un promedio de 99.80%, 83.22%, 78.37%, 76.83% y 66.74% de su valor en los puntos de monitoreo P1, P2, P3, P4 y P5, respectivamente, y en 80.99% de su valor a modo general, siendo dichos porcentajes muy elevados. De ello se observa que los puntos P1 y P5 fueron aquellos donde el ENCA y valor guía de la OMS se excedieron en mayor y menor porcentaje respectivamente, sin embargo, esto no necesariamente expresa que las concentraciones de PM_{2,5} en el punto P1 fueron mayores en el punto P5, ya que al promediar los porcentajes se están considerando los

valores máximos y atípicos de las concentraciones de $PM_{2.5}$ que no determinan necesariamente los valores en que oscilan las concentraciones de $PM_{2.5}$ en dichos puntos.

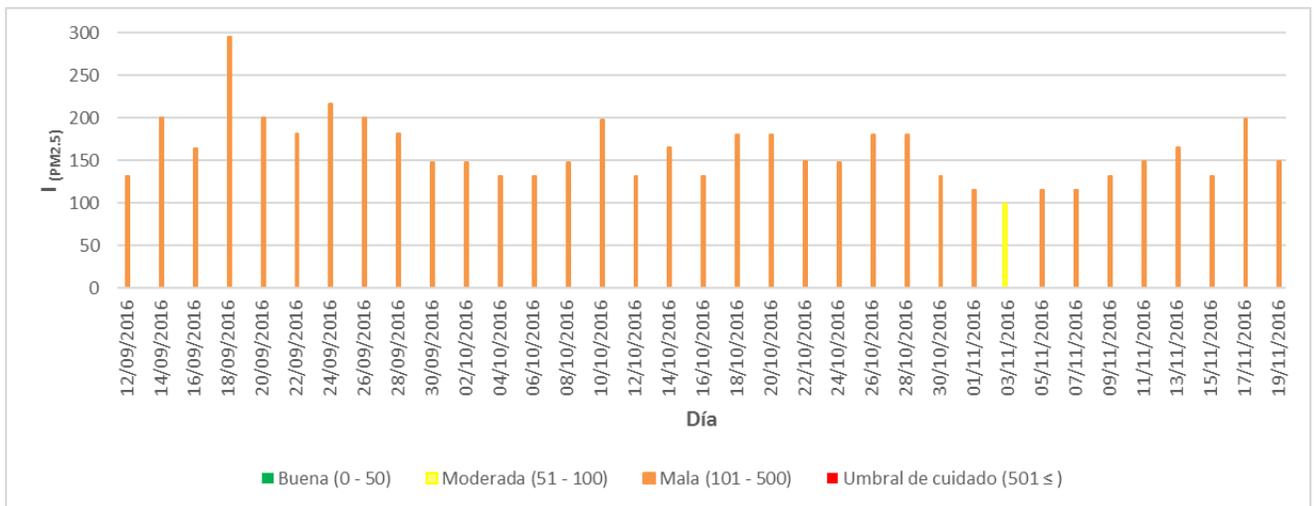
SENAMHI, a través de sus boletines mencionados líneas arriba, reportó que los porcentajes máximos con que se excedió el ENCA y el Valor Guía de la OMS en sus estaciones de la zona Lima Este oscila entre 126.7 y 166.8%, los cuales son menores al porcentaje máximo que se obtuvo en la presente investigación (216.63%). Generalmente los valores máximos de concentración de material particulado, y por ende los porcentajes máximos de superación del ENCA y valor guía de la OMS, están asociados a eventos poco frecuentes que los generan, siendo éstos a su vez diferentes de un punto de monitoreo a otro, lo cual posiblemente fue la causa de que los valores máximos o atípicos de concentración de $PM_{2.5}$ obtenidos en la presente investigación difieran de aquellos obtenidos por SENAMHI, y con ello los porcentajes máximos de superación del ENCA y valor guía.

b) Índice Nacional de Calidad del Aire (INCA)

Las Figuras 17a y 17b muestran los valores del INCA para $PM_{2.5}$ ($I_{PM_{2.5}}$) para cada uno de los días monitoreados. En ellas se puede observar que la calidad del aire respecto al $PM_{2.5}$ presentó una clasificación de *mala* y *moderada* en el 98.6% (69 de 70 días) y 1.4% (1 de 70 días) de los días monitoreados respectivamente, según los criterios establecidos en la Tabla 3 (Pag. 37). Asimismo, en la Figura 18 se observa que los valores del índice tienden a oscilar entre valores que van de 148 a 200, con un valor máximo de 317 y un valor mínimo de 99, los cuales fueron obtenidos el 21 de agosto y 03 de noviembre del 2016, respectivamente. De las Figuras 17a y 17b, además se observa que la calidad del aire fue *mala* en todos los puntos de monitoreo; sin embargo, hubo una excepción de un día en el punto P4 (03 de noviembre del 2016) en que la calidad del aire fue *moderada*, lo cual pudo deberse a las altas velocidades del viento que se registraron los días anteriores (2.9 m/s el 03 de noviembre frente a 2.5, 3.12, 3.77 y 3.92 m/s el 02 y 01 de noviembre y 31y 30 de octubre, respectivamente), las cuales pudieron favorecer la disipación del material particulado y por ende la disminución de la concentración de $PM_{2.5}$.



(a)



(b)

Figura 17. Valores diarios del Índice Nacional de Calidad del Aire para PM_{2.5} de las concentraciones obtenidas durante el periodo de monitoreo (04 julio – 19 de noviembre).

FUENTE: Elaboración propia.

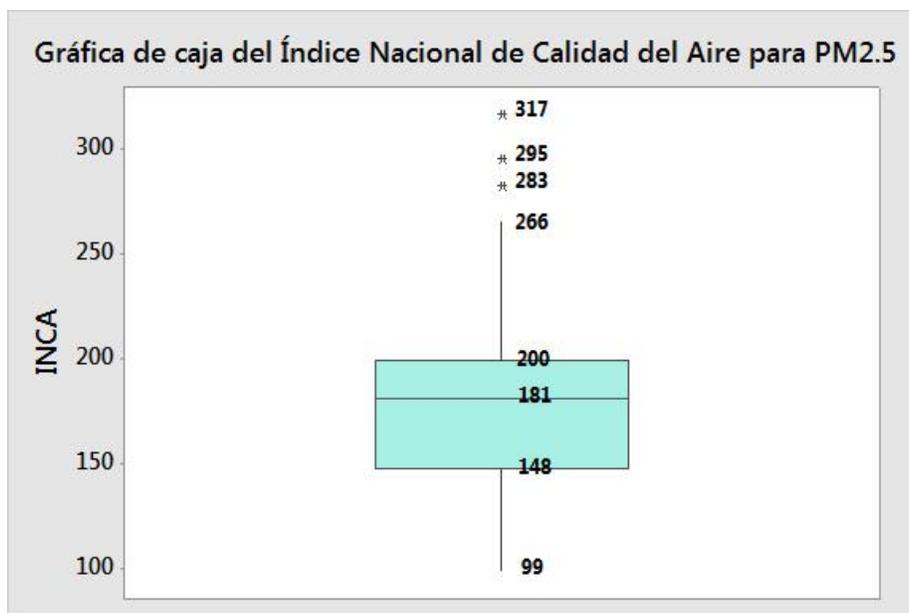


Figura 18. Distribución de los valores del Índice Nacional de Calidad del Aire para PM_{2.5} obtenidos durante el periodo de monitoreo (04 julio – 19 noviembre) representada en un gráfico de cajas. FUENTE: Elaboración propia.

Por otro lado, no hubo días con buena de la calidad del aire, por lo tanto, queda en evidencia que la salud comunidad universitaria está siendo afectada; tampoco se presentaron días con clasificación Umbral de Cuidado. Así, de acuerdo con el INCA la población sensible (niños, personas mayores y personas con enfermedades cardiorespiratorias) debió experimentar afecciones o problemas a la salud (según la Tabla 4); sin embargo, durante el periodo de monitoreo no se reportaron casos sobre miembros de la comunidad universitaria padeciendo dichos episodios, en el campus. Tal vez los efectos sobre la salud no son inmediatos (ya que las noticias acerca de afecciones respiratorias son poco frecuentes en el campus) debido a que la comunidad universitaria puede estar acostumbrada a vivir con niveles de concentración de PM_{2.5} elevados; sin embargo, los efectos a la salud pueden permanecer latentes y en un mediano o largo plazo los miembros comunidad universitaria actual podrían padecer problemas respiratorios.

Asimismo, para los valores del INCA encontrados en el campus, es recomendable evitar hacer ejercicios o realizar actividades al aire libre (según la Tabla 4); sin embargo, el campus universitario en su mayoría está compuesto por espacios al aire libre por donde los alumnos transitan, pasan el tiempo o incluso desarrollan actividades académicas y el personal contratado de la universidad realiza sus actividades laborales. Es decir, es inevitable que la comunidad universitaria desarrolle actividades al aire libre, por lo tanto, están expuestos a los efectos de las concentraciones de material particulado fino encontradas.

Actualmente no existen muchos estudios sobre determinación niveles de concentración de contaminantes atmosféricos o determinación de la calidad del aire en campus universitarios en el Perú, en especial estudios referidos al material particulado fino. Sin embargo, en algunos estudios, con el objetivo de investigar el comportamiento del $PM_{2.5}$ en otras partes del mundo, se ha establecido un punto de monitoreo en campus universitarios (como parte de una red de monitoreo más grande), como en el caso de la investigación realizada por Massoud et. al (2011). Dicho estudio permite comparar la calidad del aire del campus de la UNALM respecto al $PM_{2.5}$, con la calidad del aire en el campus universitario de la Universidad de Beirut, ubicada en Beirut, Líbano (Asia). Ambos campus universitarios comparten características semejantes ya que se encuentran constituidos por muchas áreas verdes y pequeñas carreteras (peatonales en su mayoría), asimismo se encuentran separadas por más de 200 metros de avenidas muy transitadas por el parque automotor (Carretera de la costa mediterránea en el caso de la Universidad de Beirut, y la Av. Javier Prado en el caso de la UNALM). Además, la calidad del aire encontrada en ambos campus resultó ser similar. Basados en los criterios de clasificación de la calidad del aire del INCA, en ambos campus la calidad del aire *mala*; sin embargo, se debe mencionar que el valor del INCA en el campus de la Universidad de Beirut es 112 como máximo (lo cual refiere una concentración de $PM_{2.5}$ de $28 \mu\text{g}/\text{m}^3$) mientras que en el campus de la UNALM el valor máximo es de 317 (lo cual refiere una concentración de $PM_{2.5}$ de $79.16 \mu\text{g}/\text{m}^3$). De esto se puede inferir o esperar que, en la mayoría de campus de universidades que se ubican en ciudades similares a Lima y Beirut (grandes, capitales, con alto tránsito vehicular y donde se desarrollan muchos tipos de actividades económicas), la calidad del aire también sea *mala*.

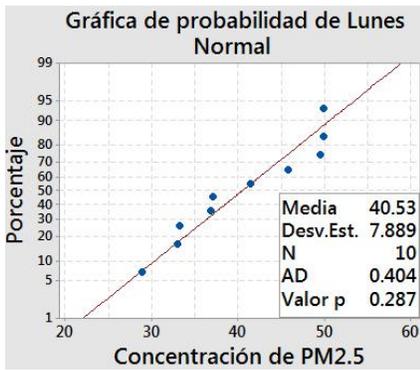
4.2.3. COMPORTAMIENTO DE LA CONCENTRACIÓN DE PM_{2,5} EN RELACIÓN A LOS DÍAS DE LA SEMANA

La Tabla 12 muestra la forma en que se agruparon los datos de concentración de PM_{2,5}, obtenidos del periodo de monitoreo, para analizar el comportamiento de los mismos en relación a los días de la semana. Los datos se agruparon según el día de la semana en que fueron obtenidos, obteniéndose 10 datos de concentración de PM_{2,5} para cada día de la semana.

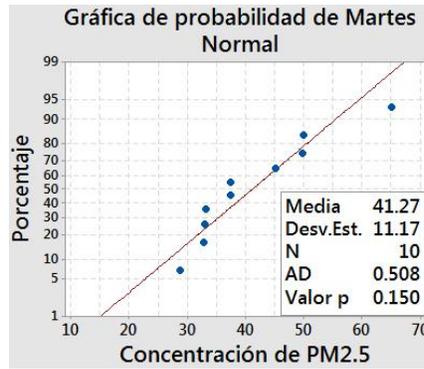
Tabla 12. Concentraciones de PM_{2,5} (µg/m³) obtenidas durante el periodo de monitoreo agrupadas según el día de la semana en que fueron obtenidas.

Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo
36.85	37.47	53.74	58.11	66.44	53.94	45.75
45.72	33.24	49.75	49.92	53.66	70.71	66.34
49.93	49.82	37.35	53.90	49.74	49.81	49.69
33.18	65.15	49.78	41.52	49.90	57.46	79.16
41.46	37.32	45.79	36.76	62.29	45.74	54.13
32.92	49.91	49.92	45.33	40.95	54.11	73.85
49.89	32.88	45.44	32.93	36.99	36.89	36.90
49.53	45.17	32.83	45.15	41.32	37.10	32.95
37.05	28.77	45.14	24.67	45.07	28.88	32.87
28.80	32.95	32.90	49.70	37.07	37.24	41.44
			Promedio			
40.53	41.27	44.26	43.80	48.34	47.19	51.31

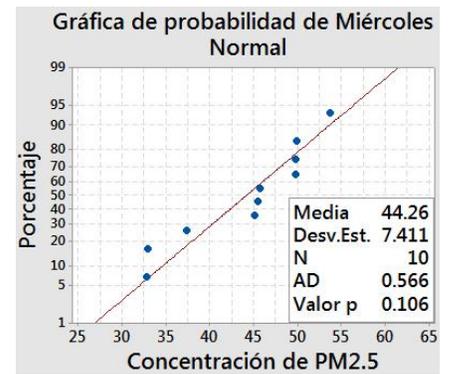
FUENTE: Elaboración propia.



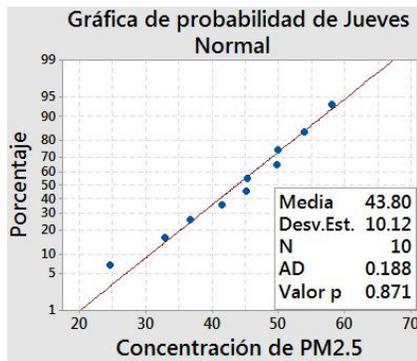
(a)



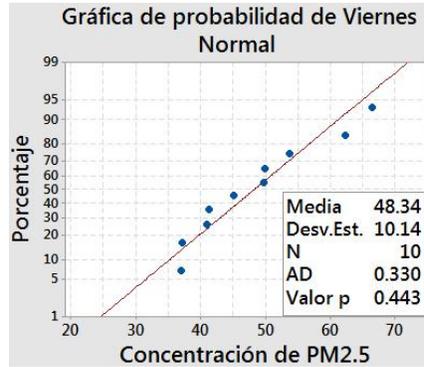
(b)



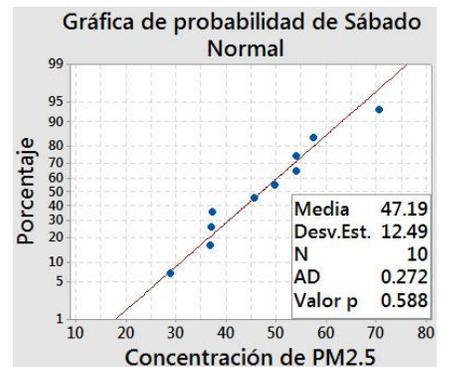
(c)



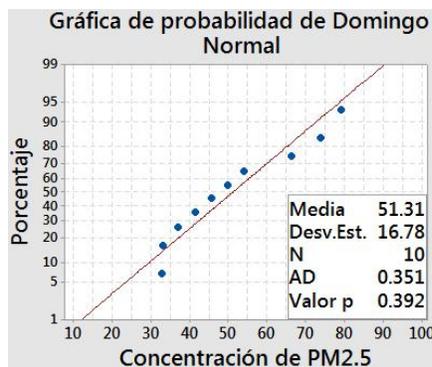
(d)



(e)



(f)



(g)

Figura 19. Resultado de prueba estadística Anderson Darling aplicada a los datos de concentración de PM_{2,5} obtenidos en los días lunes (a), martes (b), miércoles (c), jueves (d), viernes (e), sábado (f) y domingo (g) durante el periodo de monitoreo.

FUENTE: Elaboración propia.

En la Figura 19 se observa los resultados de la aplicación de la prueba de normalidad Anderson Darling sobre los grupos que se obtuvieron al agrupar los datos de concentración de $PM_{2,5}$ según el día de la semana en que se obtuvieron (como refleja la Tabla 12). Las Figuras 19a, 19b, 19c, 19d, 19e, 19f y 19g, en concordancia con la Tabla 5 (Pag. 44), muestran que para todos los días de la semana los datos de concentración de $PM_{2,5}$ presentan distribución normal ya que los valores p obtenidos (0.287, 0.150, 0.106, 0.871, 0.443, 0.588 y 0.392) son mayores al nivel de significación de la prueba ($\alpha = 0.05$); asimismo, esto se sustenta al observar que los datos se ajustan a la línea de distribución normal (línea roja) en las figuras respectivas.

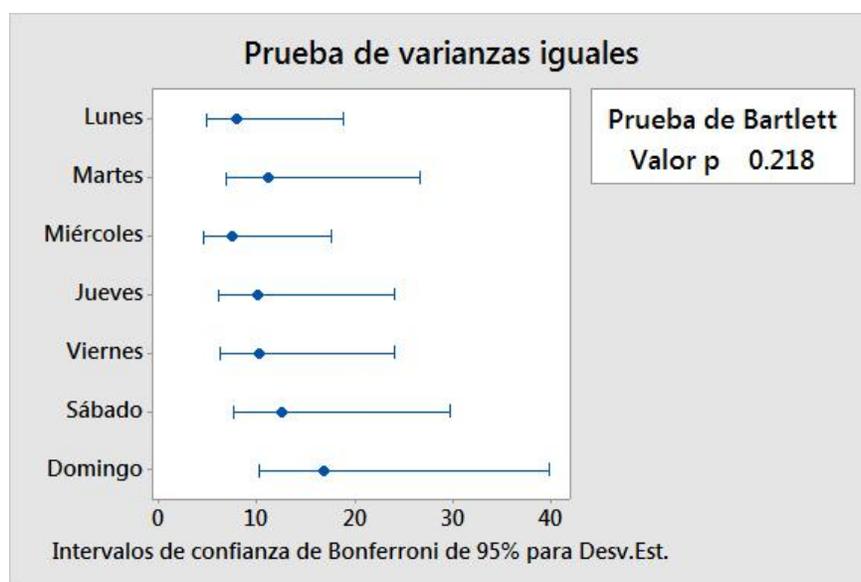


Figura 20. Resultado de prueba estadística homogeneidad de varianzas aplicado a los datos de concentración de $PM_{2,5}$ obtenidos en los días lunes, martes, miércoles, jueves, viernes, sábado y domingo, durante el periodo de monitoreo. FUENTE: Elaboración propia.

Por otro lado, en la Figura 20 se observa el resultado de la aplicación de la prueba de homogeneidad de varianzas sobre los siete grupos que se obtuvieron al agrupar los datos de concentración de $PM_{2,5}$ según el día de la semana en que se obtuvieron (como refleja la Tabla 12). En concordancia con la Tabla 5, la Figura 20 muestra que existe homogeneidad de varianzas entre los siete grupos de concentración de $PM_{2,5}$ ya que el valor p obtenido (0.218) es mayor al nivel de significación de la prueba ($\alpha = 0.05$). Es decir, existe evidencia estadística suficiente

para afirmar que las varianzas de los datos de concentración de PM_{2,5} obtenidos en los días lunes, martes, miércoles, jueves, viernes, sábado y domingo no son diferentes.

Por lo tanto, en concordancia con la Tabla 5, se cumplen los requisitos (distribución normal y varianzas iguales en todos los grupos de datos) para utilizar la prueba estadística paramétrica ANOVA de un solo factor, la cual mediante una comparación de las medias poblacionales de los grupos obtenidos de la agrupación de datos de concentración de PM_{2,5} según el día de la semana en que se obtuvieron, permite determinar si existe diferencia significativa entre ellos.

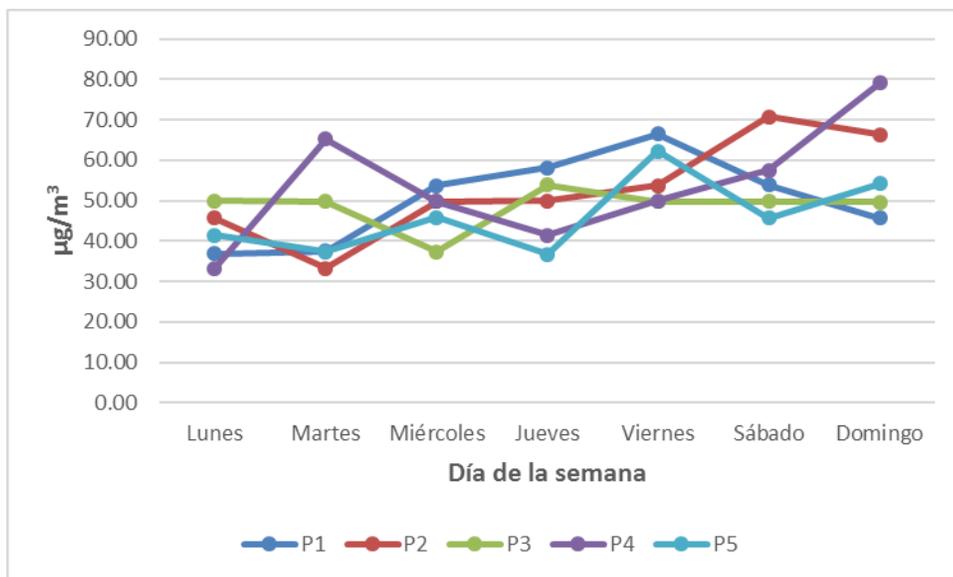
Tabla 13. Resultado de la prueba ANOVA de un solo factor aplicado a los datos de concentración de PM_{2,5} obtenidos en los días lunes, martes, miércoles, jueves, viernes, sábado y domingo, durante el periodo de monitoreo.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Factor	6	912.3	152.1	1.20	0.316
Error	63	7961.6	126.4	-	-
Total	69	8874.0	-	-	-

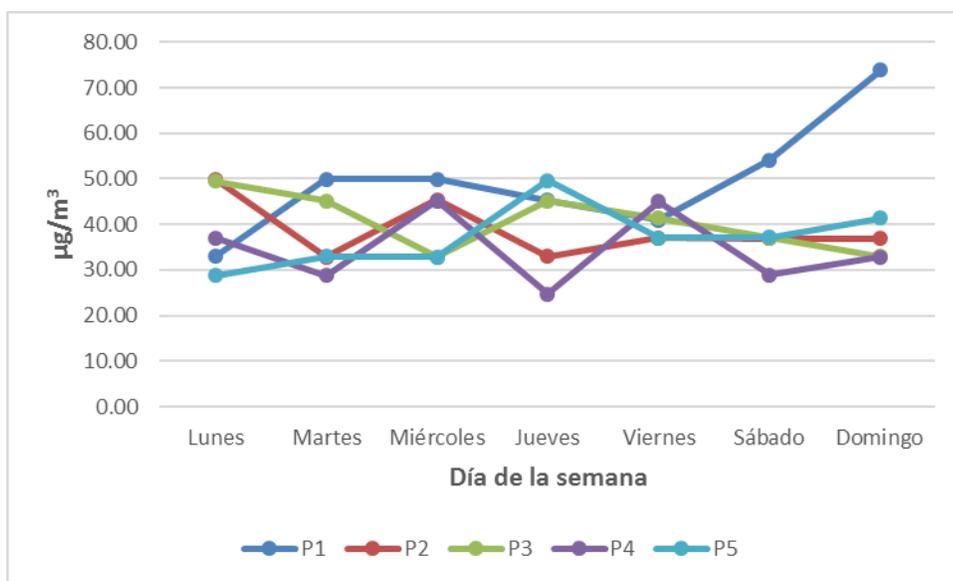
FUENTE: Elaboración propia.

Así, la Tabla 13 que muestra los resultados de la aplicación de la prueba ANOVA de un solo factor sobre los grupos obtenidos de la agrupación de datos de concentración de PM_{2,5} según el día de la semana en que se obtuvieron, en concordancia con la Tabla 5, demuestra que existe evidencia estadística suficiente para decir que las medias poblacionales de dichos grupos no son diferentes ya que el valor p obtenido (0.316) es mayor al nivel de significación de la prueba ($\alpha = 0.05$). Por lo tanto, se puede decir que es probable que entre los grupos de datos de concentración de PM_{2,5} del día lunes, martes, miércoles, jueves, viernes, sábado y domingo, no haya diferencia significativa; es decir, la concentración de PM_{2,5} fue similar en todos los días de la semana. Éste resultado sugiere que no hay una tendencia de aumento o disminución de las concentraciones de PM_{2,5} en algún día específico de la semana que se presente o sea común en todos los puntos de monitoreo. Por otro lado, se debe mencionar que no es necesario aplicar otra

prueba de comparación por pares, como la prueba de Tukey, ya que no hay media poblacional diferente que encontrar, ya que resultaron ser no diferentes en los siete grupos.



(a)



(b)

Figura 21. Tendencia por punto de monitoreo de las concentraciones de PM_{2.5} según el día de la semana en que fueron obtenidas, durante el primer (a) y segundo (b) ciclo de monitoreo.

FUENTE: Elaboración propia.

Las Figuras 21a y 21b, parecen reforzar la idea expuesta en el párrafo anterior pues se observa que las tendencias de las concentraciones de $PM_{2,5}$ no siguen un patrón similar o común en todos los puntos de monitoreo, con respecto a los días de la semana. A la vez, dichas figuras concuerdan con el resultado obtenido de la aplicación de la prueba ANOVA de un solo factor ya que muestra que la mayoría de concentraciones de $PM_{2,5}$ no varían mucho entre los días de la semana.

Por otro lado, éstos resultados difieren con los resultados encontrados por Yepés et al. (2010), Silva et al. (2013) y Pacsi (2016), quienes realizaron estudios de la calidad del aire en el área urbana del Valle de Aburrá (Antioquia, Colombia), Santiago de Cali (Valle del Cauca, Colombia) y Lima metropolitana (Lima, Perú) con datos de material particulado obtenidos en los periodos 2010, 2010-2011, 2001-2014 respectivamente. Yepés et al. (2010), Silva et al. (2013) y Pacsi (2016) con sus resultados muestran que, respecto a los días de la semana, existe una marcada tendencia de las concentraciones de $PM_{2,5}$ a disminuir en los días domingo, lo cual estos autores lo asocian con una disminución de actividades antropogénicas emisoras de material particulado en dicho día, destacando la reducción en el flujo de transporte vehicular. Sin embargo, en la presente investigación no se presenta dicha tendencia de las concentraciones de $PM_{2,5}$ a disminuir en los días domingos, lo cual puede deberse a que los patrones o tendencias de la concentración de material particulado están asociados a los patrones de usos y costumbres de la población de un área de estudio, las cuales varían de un área a otra, tal como menciona Pacsi (2016) en su investigación, o a otros factores desconocidos que hacen que las concentraciones sean similares todos los días de la semana.

En el Anexo 5, se muestran los cálculos estadísticos realizados en Minitab 17 para esta sección.

4.3. DETERMINACIÓN DE LA VARIACIÓN ESPACIAL DE LA CONCENTRACIÓN DE PM_{2,5} EN EL AIRE

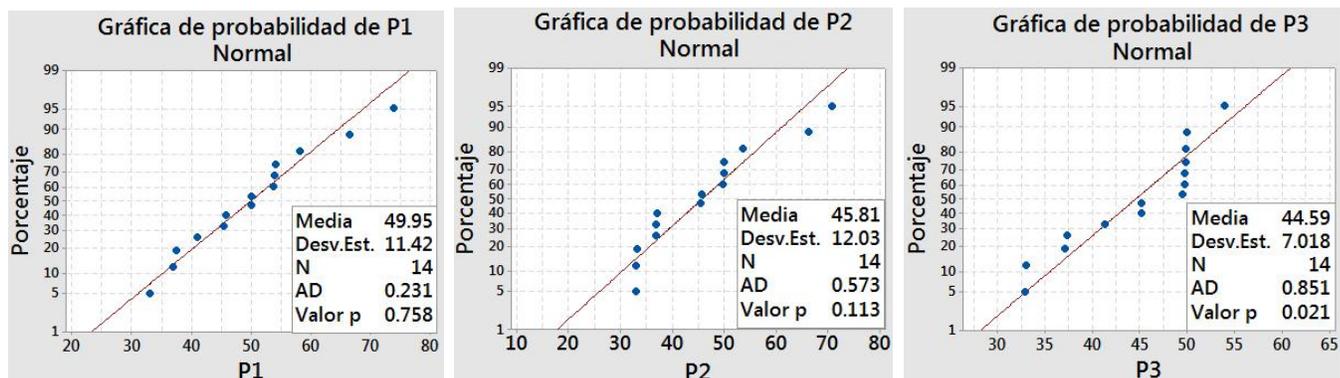
4.3.1. COMPORTAMIENTO DE LA CONCENTRACIÓN DE PM_{2,5} EN RELACIÓN A LOS PUNTOS DE MONITOREO

La Tabla 14 muestra la forma en que se agruparon los datos de concentración de PM_{2,5}, obtenidos del periodo de monitoreo, para analizar el comportamiento de los mismos en relación a los puntos de monitoreo en que fueron obtenidos. Los datos se agruparon según el punto de monitoreo que fueron obtenidos, obteniéndose 14 datos de concentración de PM_{2,5} por cada punto de monitoreo.

Tabla 14. Concentraciones de PM_{2,5} (µg/m³) obtenidas durante el periodo de monitoreo agrupadas según el punto de monitoreo en que fueron obtenidas.

P1	P2	P3	P4	P5
36.85	45.72	49.93	33.18	41.46
53.74	49.75	37.35	49.78	45.79
66.44	53.66	49.74	49.90	62.29
45.75	66.34	49.69	79.16	54.13
37.47	33.24	49.82	65.15	37.32
58.11	49.92	53.90	41.52	36.76
53.94	70.71	49.81	57.46	45.74
32.92	49.89	49.53	37.05	28.80
49.92	45.44	32.83	45.14	32.90
40.95	36.99	41.32	45.07	37.07
73.85	36.90	32.95	32.87	41.44
49.91	32.88	45.17	28.77	32.95
45.33	32.93	45.15	24.67	49.70
54.11	36.89	37.10	28.88	37.24
Mediana				
49.92	45.58	47.35	43.29	39.38

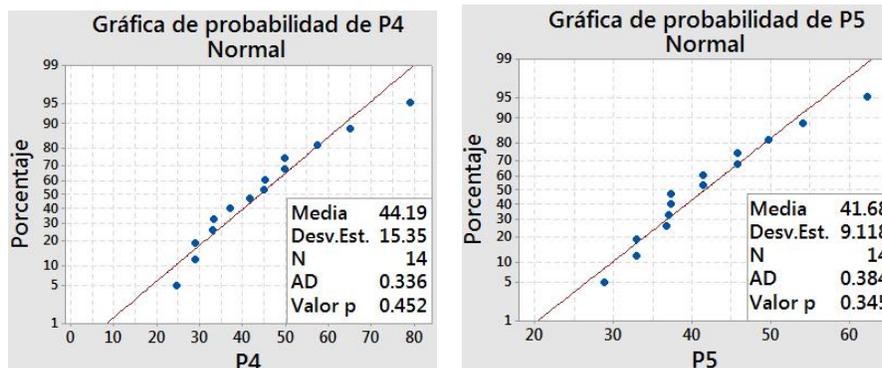
FUENTE: Elaboración propia.



(a)

(b)

(c)



(d)

(e)

Figura 22. Resultado de prueba estadística Anderson Darling aplicada a los grupos datos de concentración de $PM_{2.5}$ obtenidos en los puntos de monitoreo P1 (a), P2 (b), P3 (c), P4 (d) y P5 (e), durante el periodo de monitoreo. FUENTE: Elaboración propia.

En la Figura 22 se observan los resultados de la aplicación de la prueba de normalidad Anderson Darling sobre los grupos que se obtuvieron al agrupar los datos de concentración de $PM_{2.5}$ según el punto de monitoreo donde obtuvieron (como refleja la Tabla 14). Las Figuras 22a, 22b, 22d, y 22e, en concordancia con la Tabla 5 (Pag. 44), muestran que las concentraciones de $PM_{2.5}$ obtenidas en los puntos de monitoreo P1, P2, P4 y P5 presentan distribución normal ya que los valores p obtenidos (0.758, 0.113, 0.452 y 0.345) son mayores al nivel de significación de la prueba ($\alpha = 0.05$); asimismo, esto se sustenta al observar que los datos se ajustan a la línea de

distribución normal (línea roja) en las figuras respectivas. Por el contrario, la Figura 22c muestra que las concentraciones de PM_{2,5} obtenidas en el punto P3 no presentan distribución normal ya que el valor p obtenido (0.021) es menor al nivel de significación de la prueba ($\alpha = 0.05$); asimismo, esto se sustenta al observar que los datos no se ajustan a la línea de distribución normal (línea roja) en la figura respectiva.

Por lo tanto, en concordancia con la Tabla 5, no se cumple uno de los requisitos (distribución normal en todos los grupos de datos) de la prueba estadística paramétrica ANOVA de un solo factor la cual, mediante una comparación de las medias poblacionales de los grupos obtenidos de la agrupación de datos de concentración de PM_{2,5} según el punto de monitoreo en que fueron obtenidos, permitiría determinar si existe diferencia significativa entre ellos. Por ende, al no cumplirse los requisitos de la prueba anterior, se utilizó su equivalente no paramétrico denominado Prueba de Kruskal Wallis, la cual mediante una comparación de las medianas poblacionales de los grupos obtenidos de la agrupación de datos de concentración de PM_{2,5} según el punto de monitoreo en que fueron obtenidos, permite determinar si existe diferencia significativa entre ellos.

Tabla 15. Resultado de la prueba Kruskal Wallis aplicado a los datos de concentración de PM_{2,5} obtenidos en los puntos de monitoreo P1, P2, P3, P4 y P5, durante el periodo de monitoreo.

Punto	Datos	Mediana ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Valor p
P1	14	49.92	0.282
P2	14	45.58	
P3	14	47.35	
P4	14	43.29	
P5	14	39.38	

FUENTE: Elaboración propia.

Así, la Tabla 15 que muestra el resultado de la aplicación de la prueba Kruskal Wallis sobre los grupos obtenidos de la agrupación de datos de concentración de $PM_{2,5}$ según el punto de monitoreo donde se obtuvieron, el cual, en concordancia con la Tabla 5, demuestra que existe evidencia estadística suficiente para afirmar que las medianas poblacionales de dichos grupos no son diferentes, ya que el valor p obtenido (0.282) es mayor al nivel de significación de la prueba ($\alpha = 0.05$). Por lo tanto, se puede decir que puede que no haya diferencia significativa entre los grupos de datos de concentración de $PM_{2,5}$ de los puntos de monitoreo P1, P2, P3, P4 y P5; es decir, probablemente las concentraciones de $PM_{2,5}$ fueron similares en todos puntos de monitoreo.

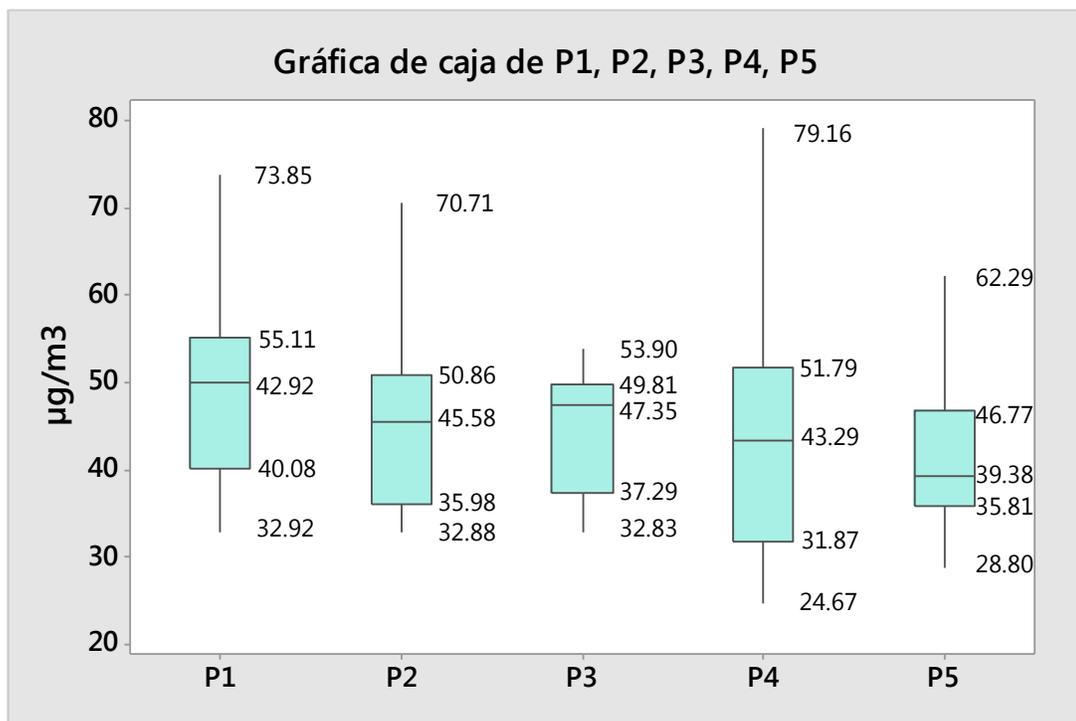


Figura 23. Distribución de los valores las concentraciones de $PM_{2,5}$ obtenidos en cada punto de monitoreo, representado en un gráfico de cajas. FUENTE: Elaboración propia.

La Figura 23 muestra que en los puntos P1, P2, P3, P4 y P5 las concentraciones de $PM_{2.5}$ oscilaron entre $40.08 - 55.11 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $35.98 - 50.86 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $37.29 - 49.81 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $31.87 - 51.79 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $35.81 - 46.77 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente (los cuales son valores que superan el valor del ENCA y al valor guía de la OMS), con unos valores máximos respectivos de 73.85, 70.71, 53.90, 79.16 y $62.29 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y unos valores mínimos respectivos de 32.92, 32.88, 32.83, 24.67 y $28.80 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Asimismo, la Figura 23 parece reforzar la idea expuesta en el párrafo anterior pues se observa en los gráficos de cajas que las concentraciones de $PM_{2.5}$ de cada punto de monitoreo oscilan entre rangos similares. Ésta figura también parece sustentar el uso de la prueba Kruskal Wallis para comparar las concentraciones de $PM_{2.5}$ de cada punto de monitoreo ya que se observa que la mayoría de cajas tienen bigotes grandes, lo cual indica que hay valores extremos altos de concentración en la mayoría de puntos de monitoreo, lo cual inhabilita a la concentración media de $PM_{2.5}$ de cada punto de monitoreo para realizar las comparaciones de datos ya que esta es sensible a valores extremos, y hace de la mediana el concepto más adecuado para realizar dichas comparaciones ya que esta no es sensible a los valores extremos. A la vez, dicha figura concuerda con el resultado obtenido de la aplicación de la prueba Kruskal Wallis ya que muestra que las medianas de los grupos datos de concentración de $PM_{2.5}$ no varían mucho entre los puntos de monitoreo.

Por otro lado, estos resultados son similares a los resultados encontrados por Silva et al. (2013) y Hu et al. (2014), quienes realizaron estudios de la calidad del aire en el área urbana de Santiago de Cali (Valle del Cauca, Colombia), y en la llanura norte de China y delta del río Yangtze (China) con datos de material particulado obtenidos en el periodo 2010-2011 y Julio (2013) – Agosto (2013). Silva et al. (2013) y Hu et al. (2014) mencionan que las concentraciones de $PM_{2.5}$ obtenidas en sus diferentes puntos de monitoreo son similares debido a las cortas distancias que hay entre ellos, lo cual sugiere que las concentraciones de $PM_{2.5}$ de los diferentes puntos de monitoreo se encuentren influenciadas por la existencia de condiciones meteorológicas similares y posiblemente por el mismo tipo de fuentes de emisión de $PM_{2.5}$. Por lo tanto, al ser relativamente cortas las distancias que separan los puntos de monitoreo de la presente investigación (ya que se enmarcan dentro del campus del a UNALM), puede que la

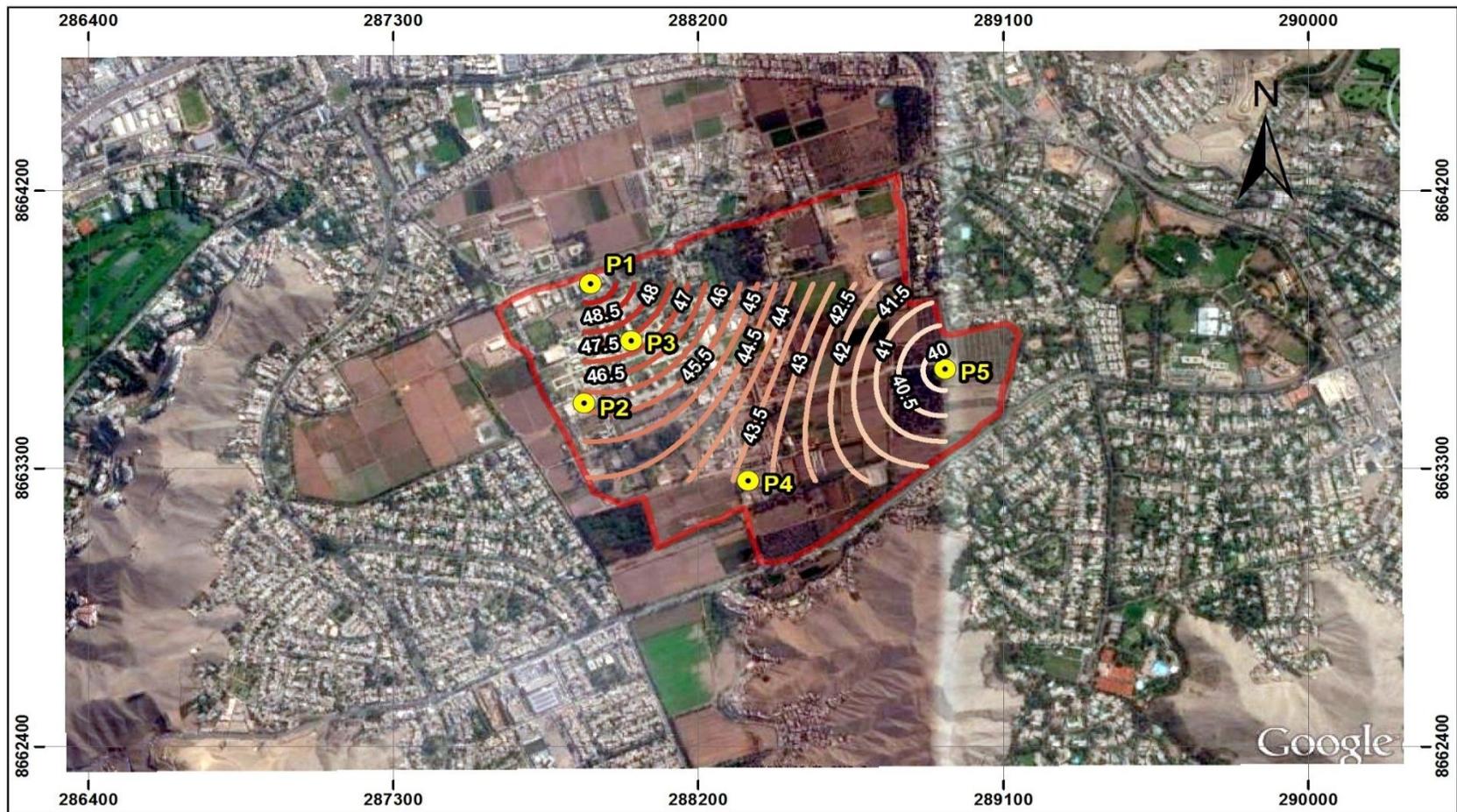
similitud de las concentraciones de $PM_{2,5}$ obtenidas en los diferentes puntos de monitoreo también se deba a lo mencionado por Silva et al. (2013) y Hu et al. (2014).

En el Anexo 6, se muestran los cálculos estadísticos realizados en Minitab 17 para esta sección.

4.3.2. DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA CONCENTRACIÓN DE $PM_{2,5}$ EN EL CAMPUS DE LA UNALM

La Figura 24 muestra una representación gráfica de la distribución espacial de la concentración de $PM_{2,5}$ en el campus de la UNALM durante el periodo de monitoreo (04 de julio – 19 de noviembre). En dicha figura se observa que la concentración de $PM_{2,5}$ es relativamente homogénea en el campus, ya que esta no varía bruscamente de una zona del campus a otra, lo cual guarda relación con los resultados obtenidos en el apartado anterior (6.3.1.). Asimismo, se observa que el $PM_{2,5}$ se distribuye en el campus con concentraciones que superan el valor del ENCA y el valor guía de la OMS (ambos de $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$), lo cual indica que posiblemente no haya zonas en el campus de la UNALM que presenten concentraciones de $PM_{2,5}$ por debajo dichos valores. Por lo tanto, se puede decir que el efecto de los niveles elevados de concentración de $PM_{2,5}$ sobre la salud de la comunidad universitaria es similar en todo el campus.

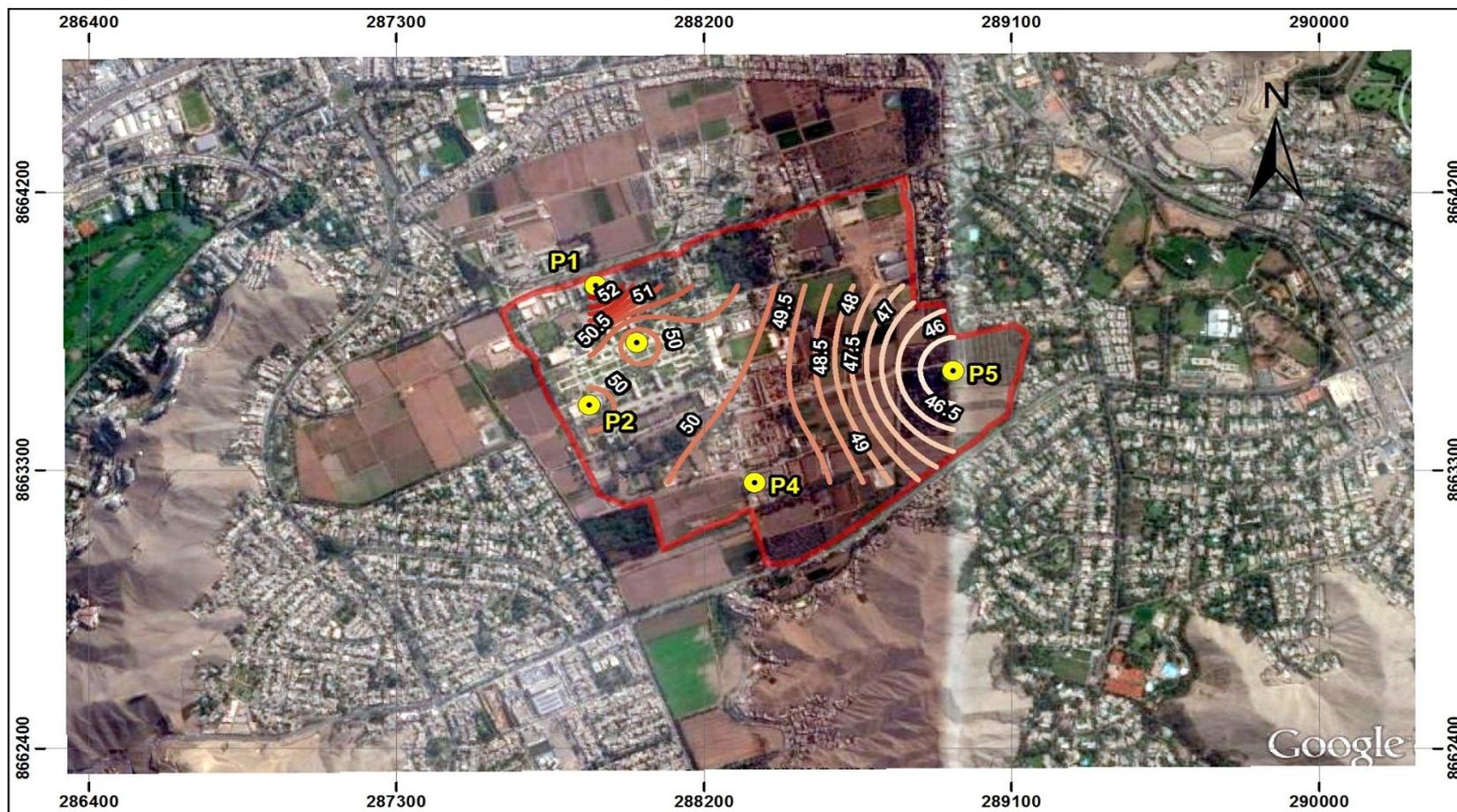
Por otra parte, la Figura 25 y Figura 26 muestra una representación gráfica de la distribución espacial de la concentración de $PM_{2,5}$ en el campus de la UNALM durante el invierno y la primavera, respectivamente. En dichas figuras se observa que el comportamiento de la concentración de $PM_{2,5}$, respecto a su valor y distribución, varía de invierno a primavera, lo cual concuerda y fortalece la idea mencionada en el apartado 6.2.1.a, de que a nivel de campus las concentraciones de $PM_{2,5}$ varían con el cambio de estación (de invierno a primavera).



LEYENDA

- PUNTOS DE MONITOREO
- CAMPUS UNALM

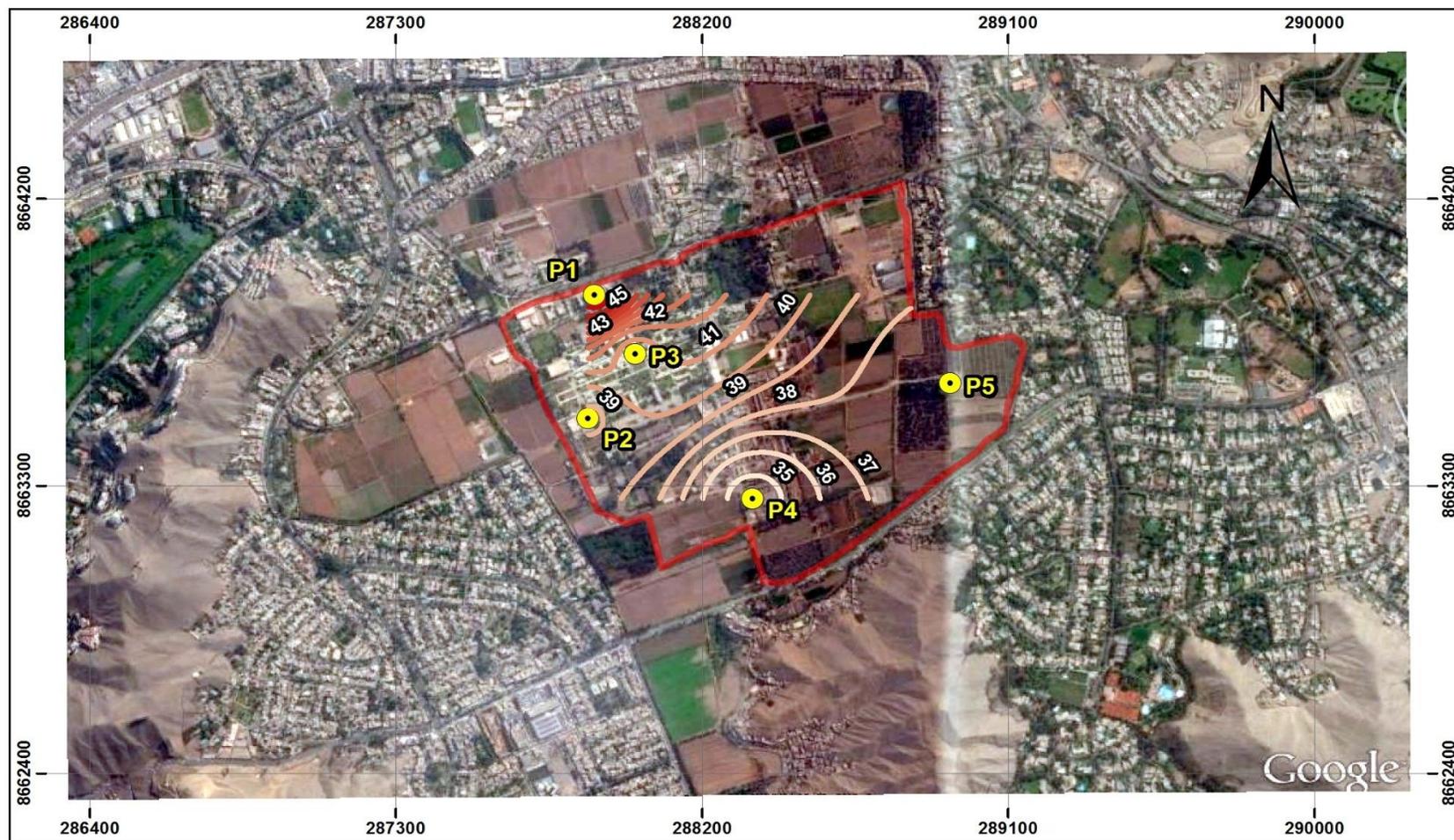
Figura 24. Isolines de concentración de PM_{2,5} en el campus de la UNALM durante el periodo de monitoreo. FUENTE: Elaboración propia usando mapas de Google Earth.



LEYENDA

- PUNTOS DE MONITOREO
- CAMPUS UNALM

Figura 25. Isolíneas de concentración de PM_{2.5} durante el invierno en el campus de la UNALM. FUENTE: Elaboración propia usando mapas de Google Earth.



LEYENDA

- PUNTOS DE MONITOREO
- CAMPUS UNALM

Figura 26. Isolneas de concentración de PM_{2,5} durante la primavera en el campus de la UNALM. FUENTE: Elaboración propia usando mapas de Google Earth.

V. CONCLUSIONES

1. Las concentraciones obtenidas del periodo de monitoreo en el campus de la UNALM presentan valores que superan estándares nacionales e internacionales de calidad ambiental, siendo la concentración promedio $45.24 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Además, son dinámicas, es decir, no se mantienen constantes en el tiempo y en el espacio (no hay dos valores de concentración de $\text{PM}_{2.5}$ exactamente iguales).
2. Los cambios estacionales (de invierno a primavera) de las concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$ no se presentan en todos los puntos de monitoreo. Esto sugiere que existieron factores, relacionados a la ubicación de los puntos de monitoreo, que impidieron obtener resultados homogéneos. Sin embargo, el hecho de que más de la mitad de puntos de monitoreo presentaron cambios en la concentración de $\text{PM}_{2.5}$ durante el cambio de estación (de invierno a primavera) es un indicio de que a nivel de campus las concentraciones varían significativamente con el cambio de estación. Por otro lado, puede que el cambio estacional de concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$ que se presentó en la mayoría de puntos de monitoreo haya sido influenciado mayoritariamente por el cambio de las condiciones meteorológicas (de invierno a primavera) que por patrones de conducta de la comunidad universitaria ya que estos no cambian significativamente con las estaciones del año.
3. Durante el periodo de monitoreo, la concentración de $\text{PM}_{2.5}$ en el campus de la UNALM guardó relación negativa con la temperatura, velocidad del viento y radiación solar, y una relación positiva con la humedad relativa. Por lo tanto, el periodo más frío, más húmedo, con vientos menos veloces y menor radiación solar, en que se presentan las mayores concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$ es el periodo de invierno. Asimismo, es posible que

durante el invierno, una parte significativa del PM_{2,5} secundario provenga de reacciones químicas entre gases contaminantes precursores (SO₂ y NO_x). Sin embargo, es necesario realizar un estudio detallado sobre composición química del PM_{2,5} para confirmar dicha suposición.

4. La concentración de PM_{2,5} en el aire ambiental del campus de la UNALM supera el valor del Estándar Nacional de Calidad Ambiental del aire para PM_{2,5} (25 µg/m³) y el Valor Guía de la Organización Mundial de la Salud (25 µg/m³) en 98.6% de los días de los días monitoreados (69 de 70 días) con valores que van de 36.89 a 42.92 µg/m³.
5. Durante el periodo de monitoreo, el 98.6% de los días monitoreados presentaron valores del Índice Nacional de Calidad del Aire para PM_{2,5} que se asocian con la clasificación de calidad del aire de *mala*. Por lo tanto, la salud de la comunidad universitaria está siendo afectada por los elevados niveles de concentración de PM_{2,5}, lo cual probablemente se manifieste en un mediano o largo plazo con la aparición de enfermedades cardiovasculares.
6. En general, durante el periodo de monitoreo la concentración de PM_{2,5} no varía significativamente con los días de la semana. A su vez, no existe un patrón común de aumento o disminución de la concentración de PM_{2,5}, para todos los puntos de monitoreo, en algún día de la semana. Asimismo, las concentraciones de PM_{2,5} no tienden a disminuir hacia el fin de semana (domingo).
7. Las concentraciones de PM_{2,5} son similares en todos los puntos de monitoreo, ya que en todos oscilan entre rangos de valores similares. Debido a que las distancias que separan los puntos de monitoreo no son exageradamente grandes (pues se enmarcan dentro del campus de la UNALM) es probable que las concentraciones de PM_{2,5} de todos los puntos de monitoreo estén influenciadas por la existencia de condiciones meteorológicas

similares y posiblemente por el mismo tipo de fuentes de emisión, los cuales son factores que favorecen la similitud de concentraciones entre un punto y otro.

8. A nivel de campus, la distribución del $PM_{2,5}$ es relativamente homogénea, pues las concentraciones no varían de forma brusca de una zona del campus a otra (según el mapa de isolineas). Por lo tanto, es probable que el efecto de las concentraciones elevadas de $PM_{2,5}$ sobre la salud de la comunidad universitaria es similar en todo el campus.

VI. RECOMENDACIONES

1. Realizar estudios complementarios enfocados al comportamiento de la concentración del $PM_{2,5}$ en relación a los cambios de estación con la finalidad de comprobar si en el campus de la UNALM las concentraciones cambian durante el cambio de estación. Se recomienda que dicha investigación colecte un número mayor de muestras, respecto a la presente investigación, por estación del año.
2. Realizar estudios sobre la composición química del material particulado con la finalidad de comprobar que la fracción de sulfatos o nitratos representa una porción significativa de la composición del $PM_{2,5}$ en el campus de la UNALM.
3. Realizar estudios acerca de los niveles de concentración y el comportamiento del $PM_{2,5}$ en otras estaciones del año, tales como verano y otoño con la finalidad de complementar el análisis realizado en la presente investigación.
4. Realizar estudios (incluido un estudio del tránsito vehicular) enfocados a construir un inventario de fuentes de emisión de $PM_{2,5}$ en el campus de la UNALM y sus inmediaciones, con la finalidad de determinar los posibles orígenes del $PM_{2,5}$ en la UNALM.
5. Realizar estudios de sobre la variación horaria del $PM_{2,5}$, con la finalidad de comprender el comportamiento de la concentración del mismo, en el campus de la UNALM, durante un día promedio.
6. Realizar un estudio integrado de la calidad del aire, respecto a $PM_{2,5}$, a nivel de los distritos de La Molina, Ate y Santa Anita, y determinar la correlación entre éstos.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ASPB (Agència de Salut Pública de Barcelona, ES). s.f. Los óxidos de nitrógeno (NO_x) en el aire urbano y la salud. Barcelona, ES. 2 p.
2. BLANCHARD, C; CARR, E; COLLINS, J; SMITH, T; LEHRMAN, D; MICHAELS, H. 1999. Spatial representativeness and scales of transport during the 1995 integrated monitoring study in California's San Joaquin Valley. *Atmospheric Environment* 33: 4775-4786.
3. BRUNEKREEF, B; DOCKERY, D; KRZYZANOWSKI, M. 1995. Epidemiologic studies on short-term effects of low levels of major ambient air pollution components. *Environ Health Perspect* 103: 3-13
4. CAFE Programme (The Clear Air For Europe Programme, DK). 2004. Second position paper on particulate matter. Copenhagen, DK. 231 p.
5. CANDANOZA, S; GORIBAR, L; GARCÍA, F. 2013. Relación partículas respirables (PM₁₀)/partículas suspendidas totales (PST) en Santa Marta (Colombia). *Dyna* no. 179:157-164
6. CRANA (Centro de Recursos Ambientales de Navarra, ES). s.f. Aerosoles o materia particulada (MPA). Navarra, ES. Consultado 05 jul. 2016. Disponible en

http://www.crana.org/es/contaminacion/mas-informacion_3/aerosoles-materia-particulada-mpa.

7. DIGESA (DIRECCIÓN GENERAL DE SALUD AMBIENTAL). 2005. Protocolo de monitoreo de la calidad del aire y gestión de los datos. Lima, PE. 71 p.
8. GAO, J; TIAN, H; CHENG, K; LU, L; ZHENG, M; WANG, S; HAO, J; WANG, K; HUA, S; ZHU, C; WANG, Y. 2015. The variation of chemical characteristics of PM_{2,5} and PM₁₀ and formation causes during two haze pollution events in urban Beijing, China. *Atmospheric Environment* 107: 1-8
9. GARCÍA, J; TANTALEÁN, J. 2008. Evaluación del grado de contaminación del aire en el Centro Histórico de Lima. *Anales Científicos de la Universidad Nacional Agraria La Molina* 69(4): 1-11
10. HE, K; YANG, F; MA, Y; ZHANG, Q; YAO, X; CHAN, C; CADLE, S; CHAN, T; MULAWA, P. 2001. The characteristics of PM_{2,5} in Beijing, China. *Atmospheric Environment*. 35: 4959-4970.
11. HU, J; WANG, Y; YING, Q; ZHANG, H. 2014. Spatial and temporal variability of PM_{2,5} and PM₁₀ over the North China Plain and the Yangtze river delta, China. *Atmospheric Environment* 95: 598-609
12. IBAÑEZ, LA. 2008. Comparación entre las metodologías de muestreo equivalentes y de referencia del material particulado atmosférico, en la ciudad de Lima. Tesis Ing. Amb. Lima, PE. Universidad Nacional Agraria La Molina. 123 p.

13. INZA, A. 2006. Estudio de los niveles de PM₁₀ y PM_{2,5} en un área urbana con influencia industrial siderometalúrgica (Beasain, Guipúzcoa). País Vasco, ES. 120 p.
14. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, CH). 1996. Climate change 1995: The science of climate change. Cambridge, UK. 588 p.
15. KHAN, M.; SHIRASUNA, Y.; HIRANO, K.; MASUNAGA, S. 2009. Characterization of PM_{2,5}, PM_{2,5-10} and PM_{>10} in ambient air, Yokohama, Japan. Atmospheric Research 96: 159-172
16. KOUYOUMDJIAN, H. Y SALIBA, N.A. 2006. Mass concentration and ion composition of coarse and fine particles in an urban area in Beirut: effect of calcium carbonate on the absorption of nitric and sulfuric acids and the depletion of chloride. Atmospheric Chemistry and Physics 6: 1865-1877
17. KRUDYSZ, M; FROINES, J; FINE, P; SIOUTAS, C. 2008. Intra-community spatial variation of size-fractionated PM mass, OC, EC, and trace elements in the Long Beach, CA area. Atmospheric Environment 42: 5374-5389
18. KULSHRESTHA, A; GURSUMEERAN, P; MASIH, J; TANEJA, AJAY. 2009. Metal concentration of PM_{2,5} and PM₁₀ particles and seasonal variations in urban and rural environment of Agra, India. Science of the Total Environment 407: 6196-6204

19. LIU, B.; SONG, N.; DAI, Q.; MEI, R.; SUI, B.; BI, X.; FENG, Y. 2015. Chemical composition and source apportionment of ambiente PM_{2,5} during the non-heating period in Tain, China. Atmospheric Research 170: 23-33
20. MAGRAMA (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente de España). s.f. Óxidos de Nitrógeno. Madrid, ES. Consultado 28 jun. 2016. Disponible en <http://www.prtr-es.es/NOx-oxidos-de-nitrogeno,15595,11,2007.html>.
21. MAGRAMA (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente de España). s.f. Amoniac. Madrid, ES. Consultado 28 jun. 2016. Disponible en <http://www.prtr-es.es/NH3-amoniaco,15593,11,2007.html>.
22. MASSOUD, R; SHIHADDEH, AL; ROUMIÉ, M; YOUNESS, M; GERARD, J; SALIBA, N; ZAAROUR, R; ABBOUD, M; FARAH, W; SALIBA, NA. 2011. Intraurban variability of PM₁₀ and PM_{2,5} in an Eastern Mediterranean city. Atmospheric Research 101: 893-901
23. MINITAB INC. 2013. (Guía de ayuda del software Minitab 17). Carolina del Norte, US. Consultado 02 nov. 2016.
24. OBSERVATORIO AMBIENTAL DE BOGOTÁ. 2012. Diagnóstico ambiental local Puente Aranda. Bogotá, CO. 31 p.
25. OEFA (ORGANISMO DE EVALUACIÓN Y FISCALIZACIÓN AMBIENTAL). 2015. Instrumentos básicos para la fiscalización ambiental. Lima, PE. 52 p.

26. OMS (ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD). 2006. Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y dióxido de azufre. Ginebra, CH. p. 21
27. PACSI, S. 2016. Análisis temporal y espacial de la calidad del aire determinado por material particulado PM₁₀ y PM_{2,5} en Lima metropolitana. Anales científicos de la Universidad Nacional Agraria La Molina. 77(2): 273-283
28. PALACIO, DF; ZAFRA, CA; RODRIGUEZ, JP. 2014. Evaluación de la calidad del aire mediante un laboratorio móvil: Puente Aranda (Bogotá D.C., Colombia). Revista Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia no. 71: 153-166
29. PÉRTEGAS, S; PITA, S. 2002. Determinación del tamaño muestral para calcular la significación del coeficiente de correlación lineal. Cuadernos de Atención Primaria 9(4): 209-211
30. PINTO, J; LEFOHN, A; SHADWICK, D. 2004. Spatial variability of PM_{2,5} in urban areas in the United States. Air & Waste Management Association 54: 440-449
31. QUEROL, X; ALASTUEY, A; VIANA, MM; RODRIGUEZ, S; ARTIÑANO, B; SALVADOR, P; GARCÍA, S; FERNANDEZ, R; RUIZ, CR; ROSA, J DE LA; SANCHEZ, A; MENENDEZ, M; GIL, J. 2004. Speciation and origin of PM₁₀ and PM_{2,5} in Spain. Aerosol Science 35: 1151-1172
32. RODRIGUEZ, C; GUTIÉRREZ, J; POZO, T. s.f. Fundamentos conceptuales de las principales pruebas de significación estadística en el ámbito educativo. Granada, ES. Grupo editorial Universitario. 60 p.

33. ROJAS, M. 2003. Técnicas estadísticas paramétricas y no paramétricas equivalentes: resultados comparativos por simulación. Tesis Ing. Est. Guayaquil, EC. Escuela Superior Politécnica del Litoral. 312 p.
34. SALAZAR, R; TOWNSEND, A. 2009. Se te subieron los humos. *Semana Económica* set. 2009: 4-6
35. SALVADOR, P; ARTIÑANO, B; VIANA, MM; QUEROL, X; ALASTUEY, A; GONZÁLEZ, I; ALONSO, R. 2011. Spatial and temporal variations in PM10 and PM_{2,5} across Madrid metropolitan area in 1999-2008. *Procedia Environmental Sciences* 4: 198-208
36. SANTIAGO, M. 2013. Estudio de la formación de aerosoles orgánicos secundarios en un modelo fotoquímico mediante experimentos en una cámara de simulación atmosférica. Tesis Dr. Madrid, ES. Universidad Complutense de Madrid. 279 p.
37. SCHWARTZ, J; DOCKERY, D; NEAS, L. 1996. Is daily mortality associated specifically with fine particles?. *Air & Waste Management Association* 46: 927-939
38. SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, MX). 2011. Guía metodológica para la estimación de emisiones de PM_{2,5}. Ed. AM Sánchez. México. 101 p.
39. SENAMHI (SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA). 2013. Evaluación de la calidad del aire en Lima Metropolitana 2011. Lima, PE. 69 p.

40. SENAMHI (SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA). 2016a. Vigilancia de la calidad del aire Agosto 2016. Boletín mensual. 16(7): 1-18

41. SENAMHI (SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA). 2016b. Vigilancia de la calidad del aire Julio 2016. Boletín mensual. 16(7): 1-18

42. SENAMHI (SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA). 2016c. Vigilancia de la calidad del aire Noviembre 2016. Boletín mensual. 16(7): 1-18

43. SENAMHI (SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA). 2016d. Vigilancia de la calidad del aire Octubre 2016. Boletín mensual. 16(7): 1-18

44. SENAMHI (SERVICIO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA). 2016e. Vigilancia de la calidad del aire Setiembre 2016. Boletín mensual. 16(7): 1-18

45. SILVA, JP; CANCHALA, T. 2013. Variación espacial y temporal de concentraciones de PM10 en el área urbana de Santiago de Cali, Colombia. Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente no. 12: 129-141

46. TOLIS, E; SARAGA, D; LYTRA, M; PAPATHANASIOU, A; BOUGAIDIS, P; PREKAS-PATRONAKIS, O; IOANNIDIS, I; BARTZIS, J. 2015. Concentration and chemical composition of PM_{2,5} for a one-year period at Thessaloniki, Greece: A comparison between city and port area. Atmospheric Environment 113: 197-207

47. TORO, V; MARÍN, A. 2006. Índice de calidad del aire para el valle de Aburrá. Producción + Limpia 1(1): 103-107
48. UAH (Universidad de Alcalá), ES. 2005. Métodos de análisis de datos en ecología. Madrid, ES. 31 p.
49. USEPA (United States Environmental Protection Agency, US). 2009. Integrated science assessment for particulate matter. Washington D.C, US. 2228 p.
50. USEPA (United States Environmental Protection Agency, US). s.f. Air Quality Index (AQI) Basics. Washington D.C, US. Consultado 08 jul. 2016. Disponible en <https://airnow.gov/index.cfm?action=aqibasics.aqi>.
51. VIANA, M. 2003. Niveles, composición y origen del material particulado atmosférico en sectores norte y este de la Península Ibérica y Canarias. Tesis Dr. Barcelona, ES. 386 p.
52. WARK, L; WARNER, C. 1994. Contaminación del aire: origen y control. México. Editorial Limusa. p. 223
53. WILSON, J; KINGHAM, S; PEARCE, J; STURMAN, A. 2005. A review of intraurban variations in particulate air pollution: implications for epidemiological research. Atmospheric Environment 39: 6444-6462

54. YE, B; JI, X; YANG, H; YAO, X; CHAN, C; CADLE, S; CHAN, T; MULAWA, P. 2002. Concentration and chemical composition of PM_{2,5} in Shanghai for a 1-year period. *Atmospheric Environment*. 37: 499-510.
55. YEPÉS, L; PÉREZ, LJ; TABÓN, JL; TAKAHASHI, HT; BENÍTEZ, D; HIGUITA, HD; GRAJALES, VH. 2010. Evaluación de los niveles de contaminación en las zonas urbanas del valle de Aburrá: caracterización y análisis de la contribución de fuentes de material particulado PM_{2,5} en tres (3) zonas del valle de Aburrá. Medellín. p. 26-37

VIII. ANEXOS

ANEXO 1: Niveles de estados de alerta nacionales de contaminantes del aire (Decreto Supremo N° 012-2005-SA).

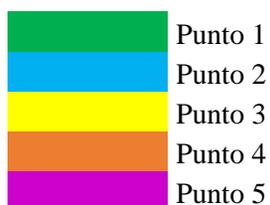
"Artículo 3º.- Aprobación de los niveles de estado de alerta
Apruébese los niveles de estados de alerta nacionales de contaminantes del aire respecto de los siguientes contaminantes críticos:

TIPOS DE ALERTA	Material Particulado (PM10)	Dióxido de Azufre (SO ₂)	Monóxido de Carbono (CO)	Sulfuro de Hidrógeno (H ₂ S)
Cuidado	>250 ug/m ³ prom. aritmético 24 horas	>500 ug/m ³ prom. móvil 3 horas	>15 000 ug/m ³ prom. móvil 8 horas	>1 500 ug/m ³ prom. aritmético 24 horas
Peligro	>350 ug/m ³ prom. aritmético 24 horas	>1 500 ug/m ³ prom. móvil 3 horas	>20 000 ug/m ³ prom. móvil 8 horas	>3 000 ug/m ³ prom. aritmético 24 horas
Emergencia	>420 ug/m ³ prom. aritmético 24 horas	>2 500 ug/m ³ prom. móvil 3 horas	>35 000 ug/m ³ prom. móvil 8 horas	>5 000 ug/m ³ prom. aritmético 24 horas

Según R.M. 181-2016-MINAM, para el material particulado PM_{2,5}, el valor umbral de Cuidado corresponde al 50% del valor del PM₁₀, tal como lo establece las recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud (OMS), es decir 125 µg/m³ para 24 horas.

ANEXO 2: Frecuencia y cronograma de monitoreo

	Lunes	Martes	Miercoles	Jueves	Viernes	Sabado	Domingo
Julio					1	2	3
	4	5	6	7	8	9	10
	11	12	13	14	15	16	17
	18	19	20	21	22	23	24
	25	26	27	28	29	30	31
Agosto	1	2	3	4	5	6	7
	8	9	10	11	12	13	14
	15	16	17	18	19	20	21
	22	23	24	25	26	27	28
	29	30	31				
Setiembre				1	2	3	4
	5	6	7	8	9	10	11
	12	13	14	15	16	17	18
	19	20	21	22	23	24	25
	26	27	28	29	30		
Octubre						1	2
	3	4	5	6	7	8	9
	10	11	12	13	14	15	16
	17	18	19	20	21	22	23
	24	25	26	27	28	29	30
	31						
Noviembre		1	2	3	4	5	6
	7	8	9	10	11	12	13
	14	15	16	17	18	19	20
	21	22	23	24	25	26	27
	28	29	30				



ANEXO 3: Cálculos estadísticos realizados en Minitab 17 para la sección “Diferencia o igualdad de los grupos de concentración de $PM_{2,5}$ obtenidas en invierno y primavera”.

Figura 1. Gráfico de la prueba estadística homogeneidad de varianzas entre las concentraciones de invierno y primavera del punto P1.

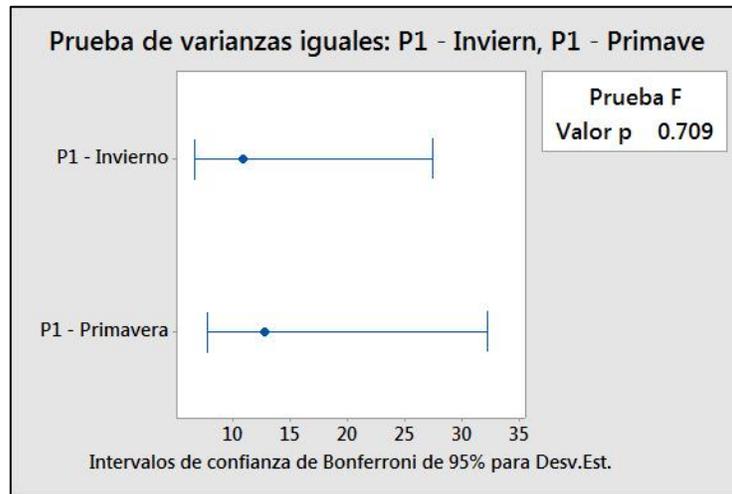


Figura 2. Desarrollo prueba estadística homogeneidad de varianzas entre las concentraciones de invierno y primavera del punto P1.

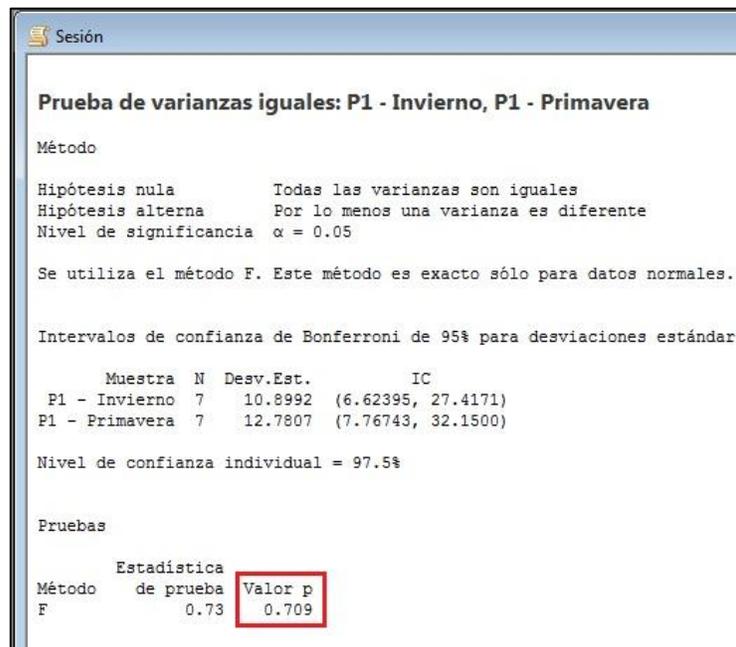


Figura 3. Desarrollo de la prueba estadística t en dos muestras entre las concentraciones de invierno y primavera del punto P1.

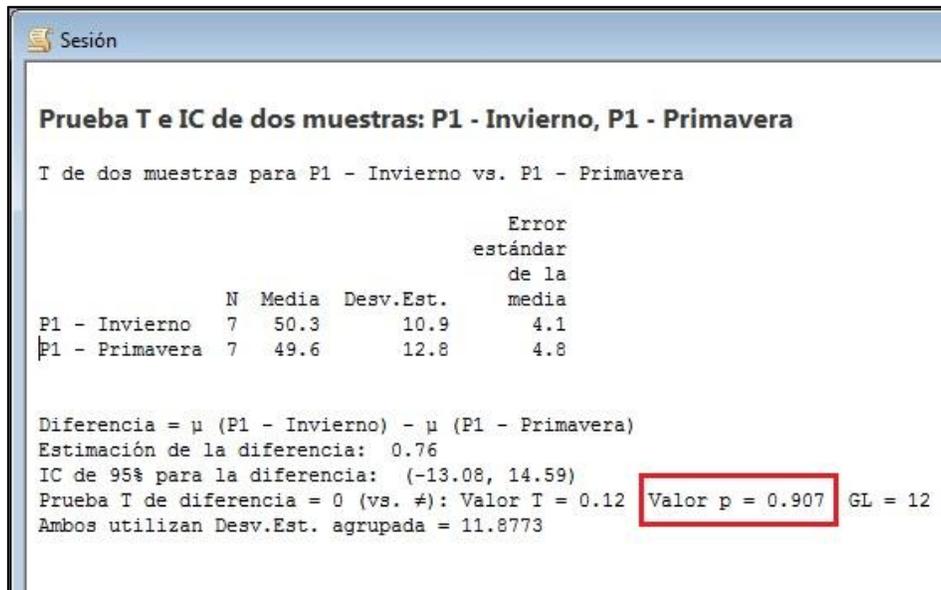


Figura 4. Gráfico de la prueba estadística homogeneidad de varianzas entre las concentraciones de invierno y primavera del punto P2.

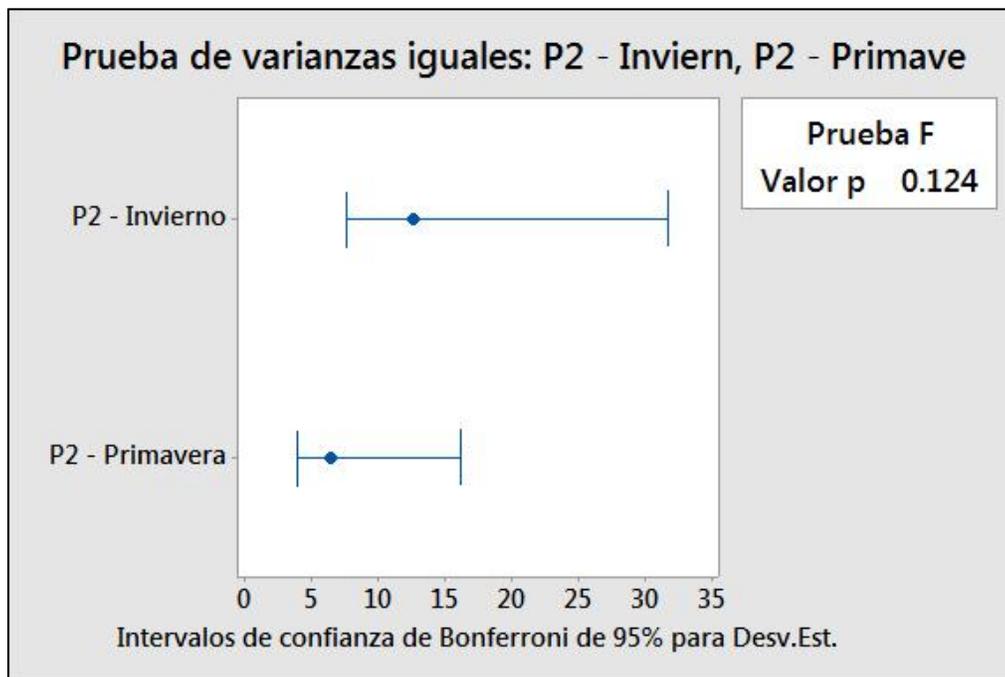


Figura 5. Desarrollo prueba estadística homogeneidad de varianzas entre las concentraciones de invierno y primavera del punto P2.

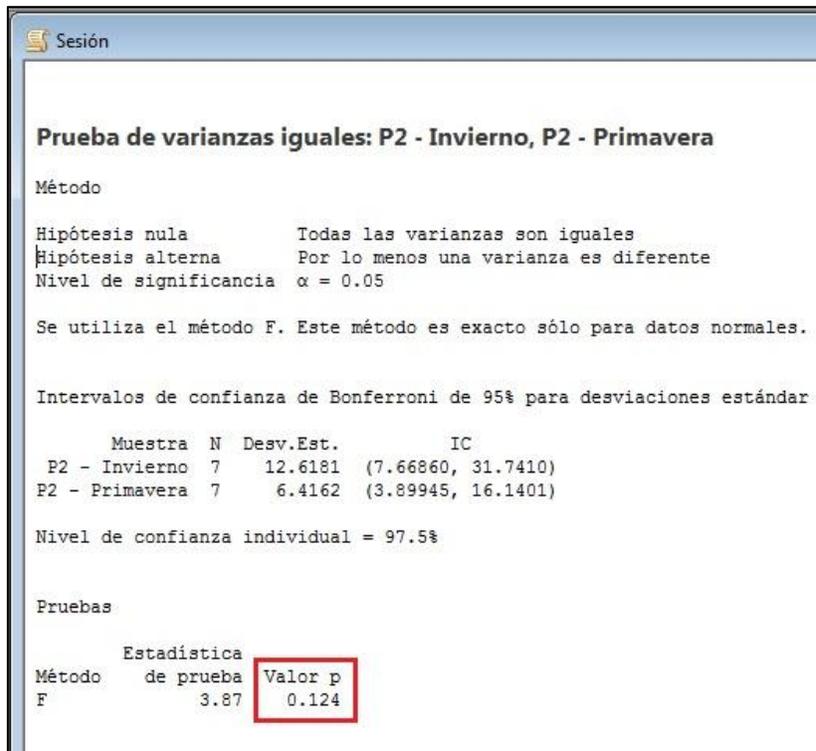


Figura 6. Desarrollo de la prueba estadística t en dos muestras entre las concentraciones de invierno y primavera del punto P2.

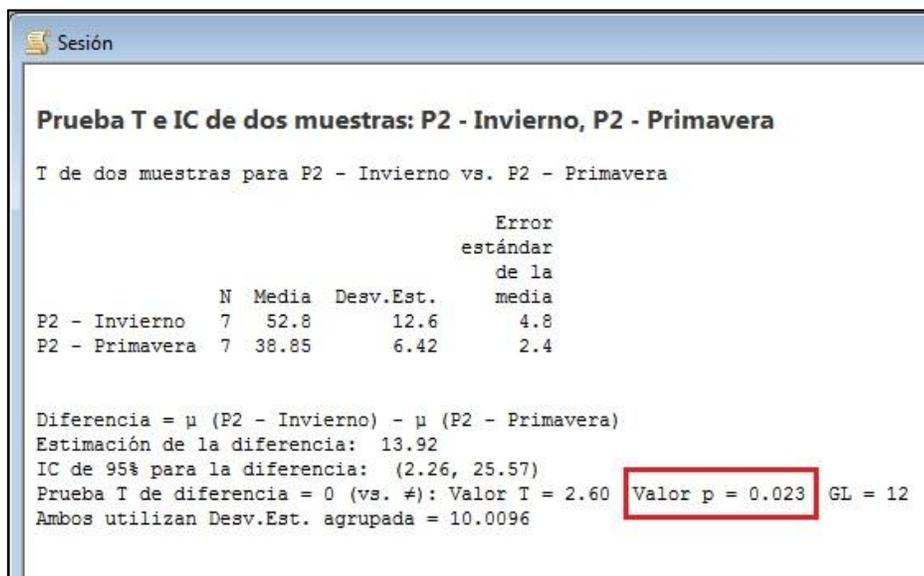


Figura 7. Desarrollo de la prueba estadística U de Mann Whitney entre las concentraciones de invierno y primavera del punto P3.

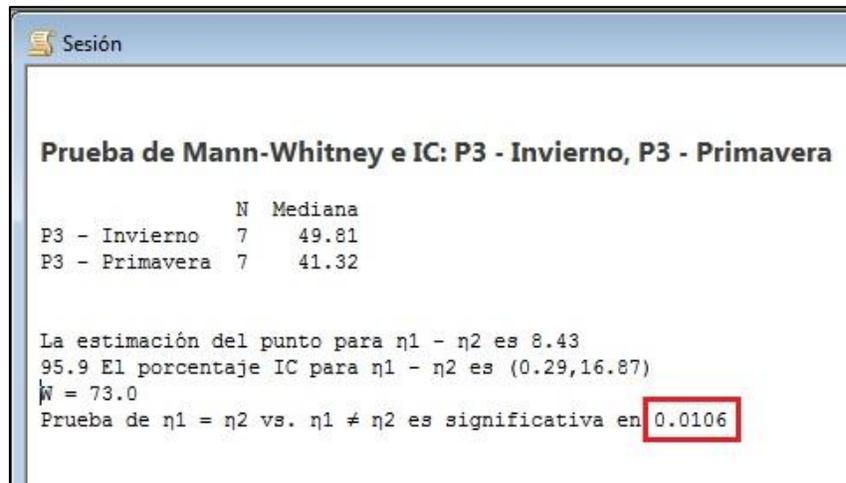


Figura 8. Gráfico de la prueba estadística homogeneidad de varianzas entre las concentraciones de invierno y primavera del punto P4.

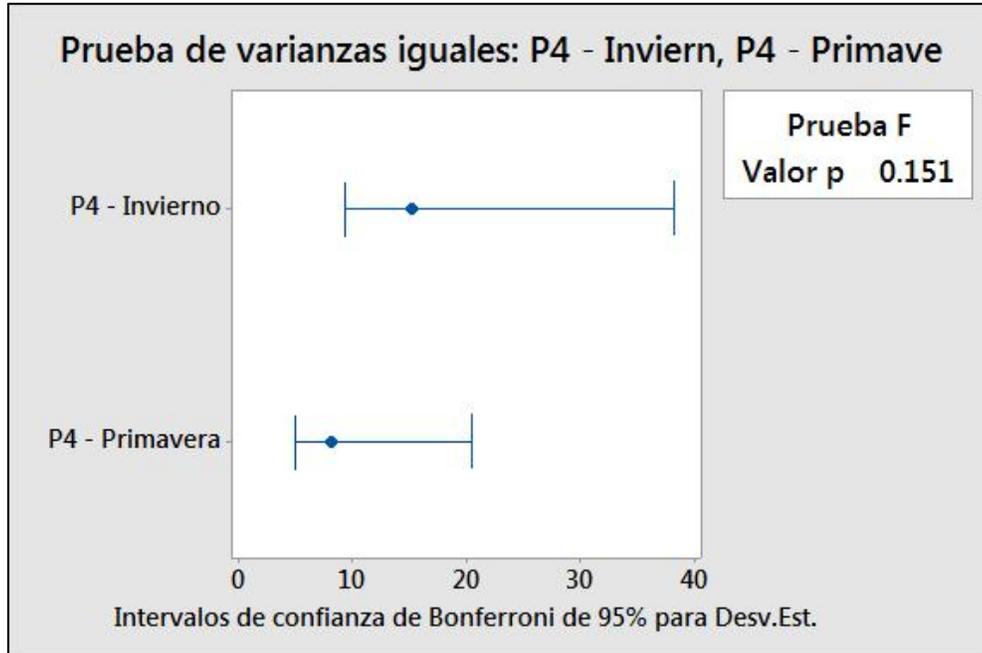


Figura 9. Desarrollo prueba estadística homogeneidad de varianzas entre las concentraciones de invierno y primavera del punto P4.

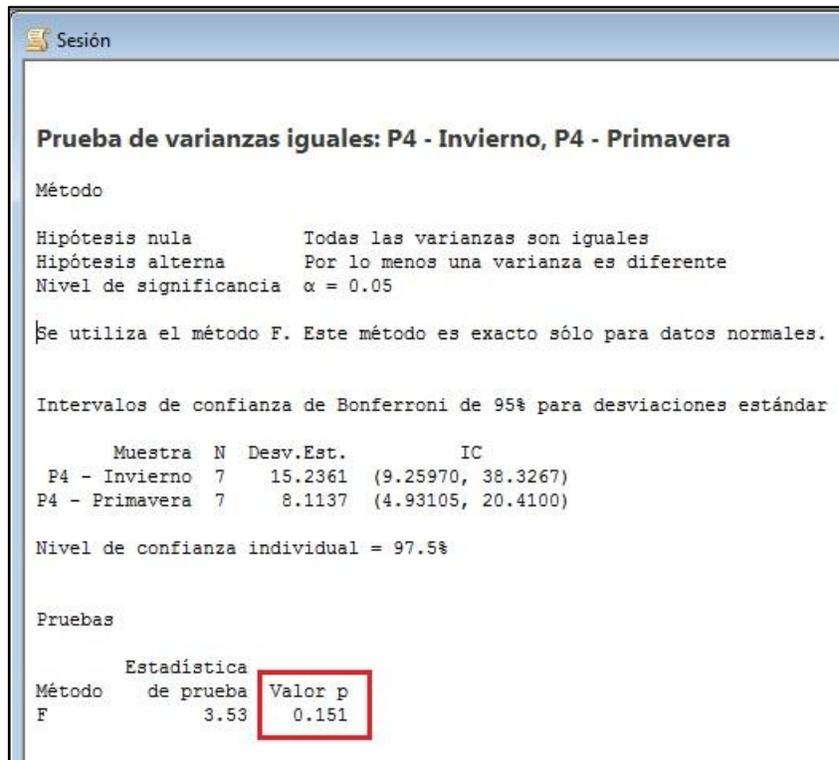


Figura 10. Desarrollo de la prueba estadística t en dos muestras entre las concentraciones de invierno y primavera del punto P4.

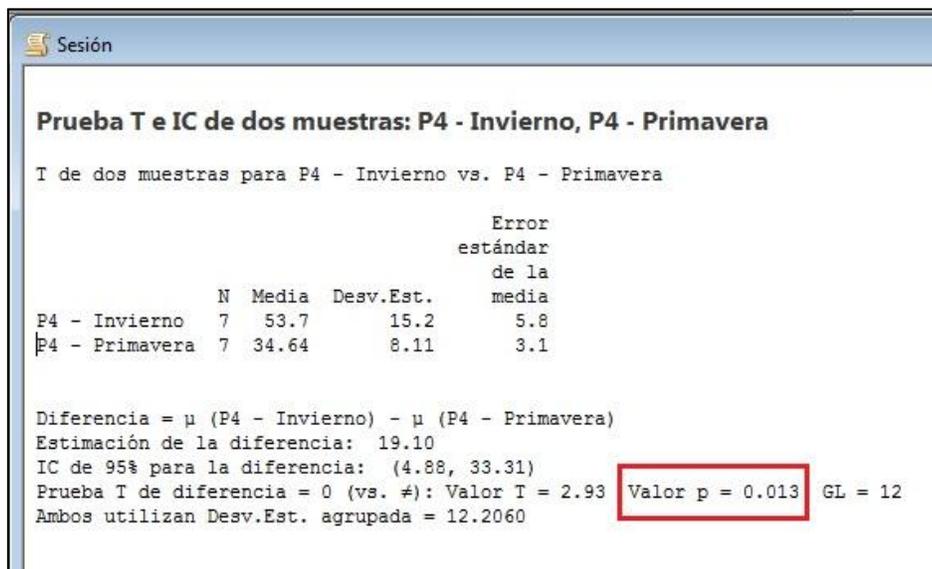


Figura 11. Gráfico de la prueba estadística homogeneidad de varianzas entre las concentraciones de invierno y primavera del punto P5.

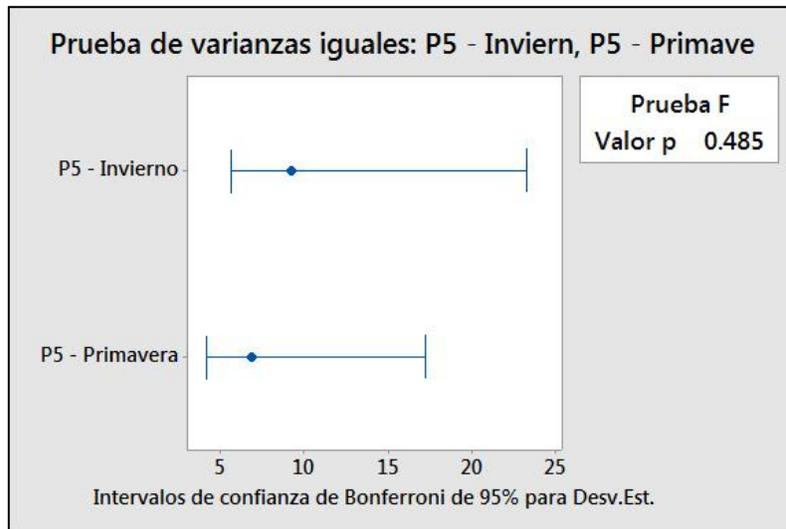


Figura 12. Desarrollo prueba estadística homogeneidad de varianzas entre las concentraciones de invierno y primavera del punto P5.

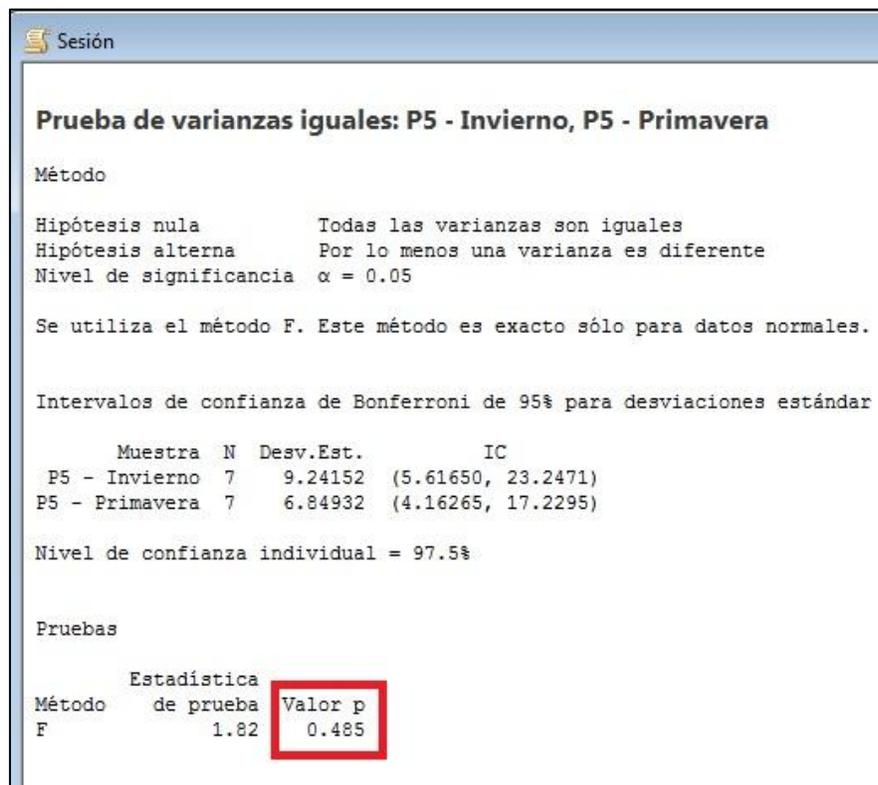
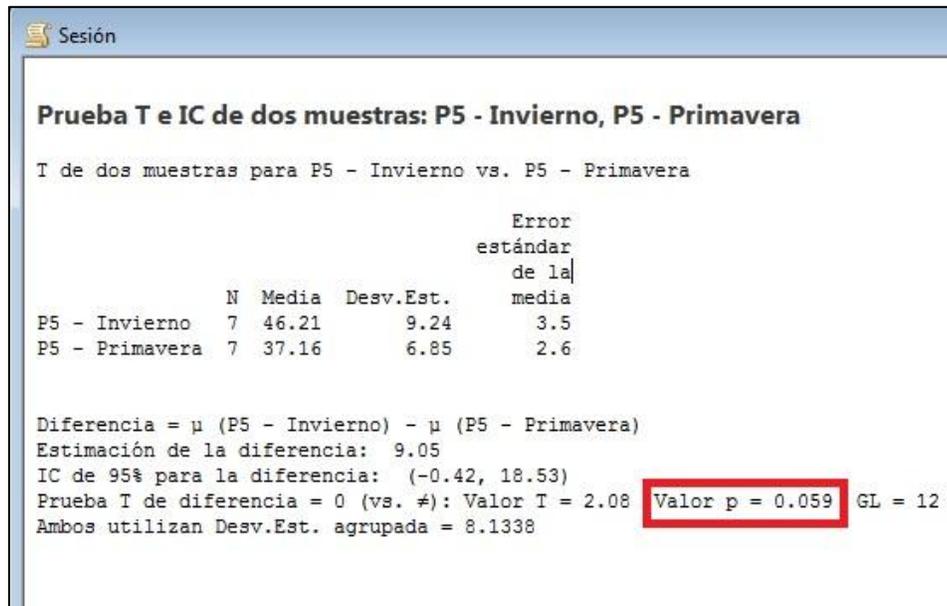


Figura 13. Desarrollo de la prueba estadística t en dos muestras entre las concentraciones de invierno y primavera del punto P5.



ANEXO 4: Cálculos estadísticos realizados en Minitab 17 para la sección “Determinación de la correlación entre valores de concentración de $PM_{2.5}$ y valores de variables meteorológicas temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y radiación solar”.

Figura 1. Desarrollo de la prueba estadística correlación de spearman entre la concentración de $PM_{2.5}$ y la temperatura.

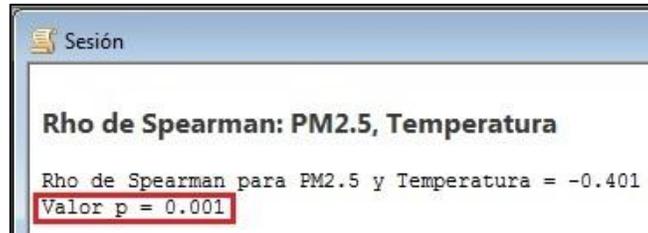


Figura 2. Desarrollo de la prueba estadística correlación de spearman entre la concentración de $PM_{2.5}$ y la humedad relativa.

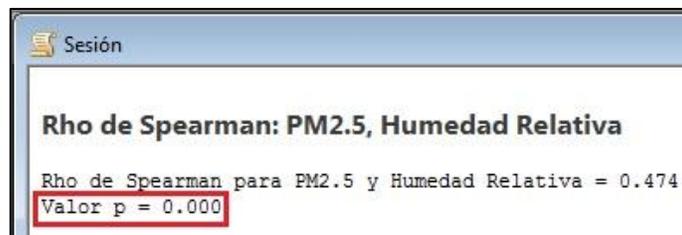


Figura 3. Desarrollo de la prueba estadística correlación de spearman entre la concentración de $PM_{2.5}$ y la velocidad del viento.

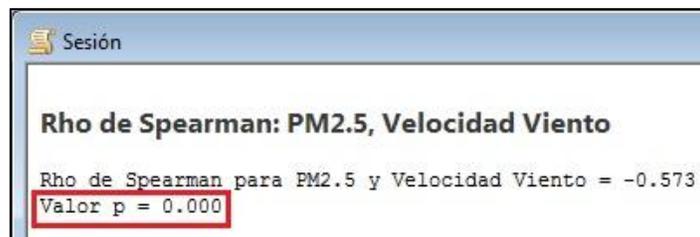
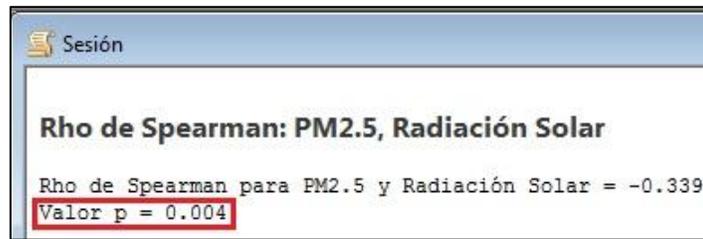


Figura 4. Desarrollo de la prueba estadística correlación de spearman entre la concentración de PM_{2,5} y la radiación solar.



ANEXO 5: Cálculos estadísticos realizados en Minitab 17 para la sección “Comportamiento de la concentración de $PM_{2,5}$ en relación a los días de la semana”.

Figura 1. Gráfico de la prueba estadística homogeneidad de varianzas entre las concentraciones de $PM_{2,5}$ obtenidos en cada uno de los días de la semana.

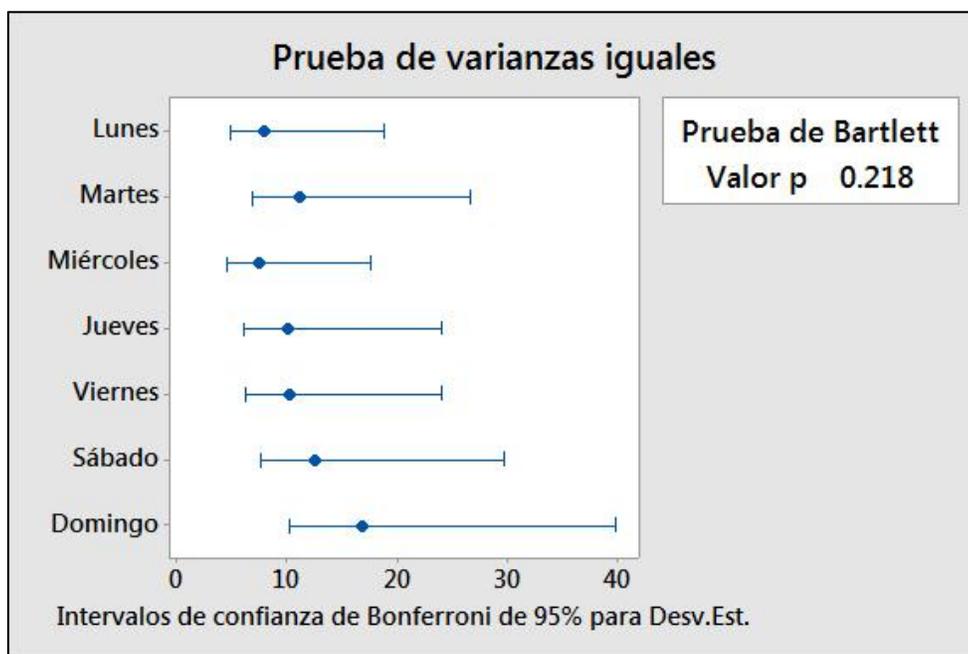


Figura 2. Desarrollo prueba estadística homogeneidad de varianzas entre las concentraciones de PM_{2,5} obtenidos en cada uno de los días de la semana.

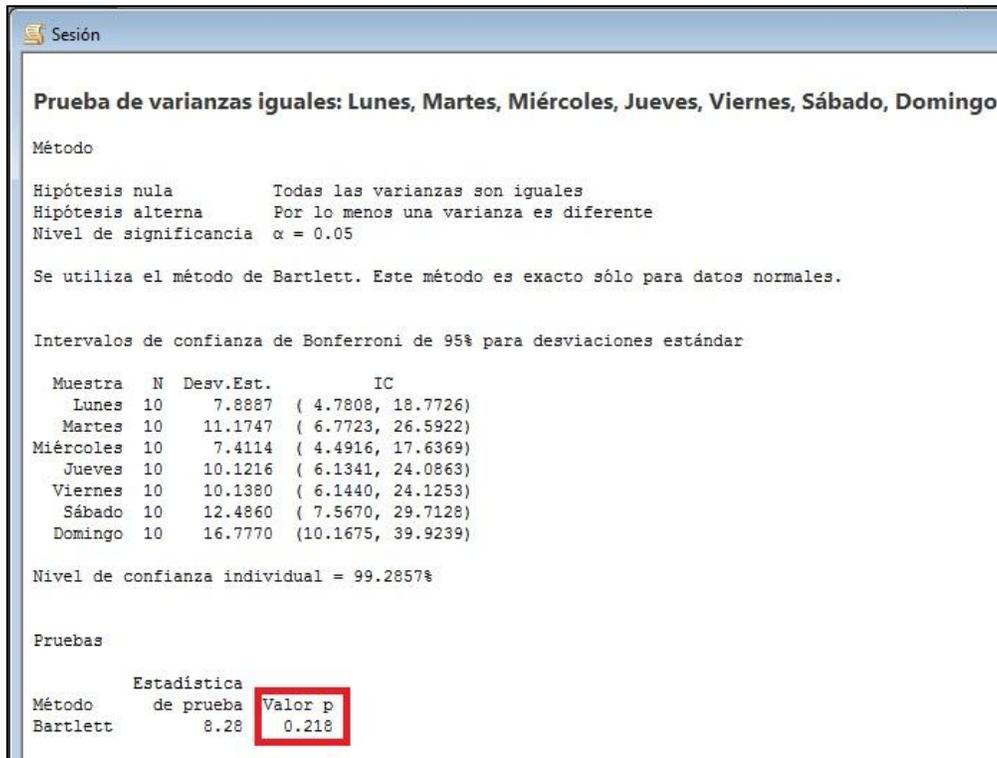


Figura 3. Desarrollo prueba estadística ANOVA de un solo factor entre las concentraciones de PM_{2,5} obtenidos en cada uno de los días de la semana.

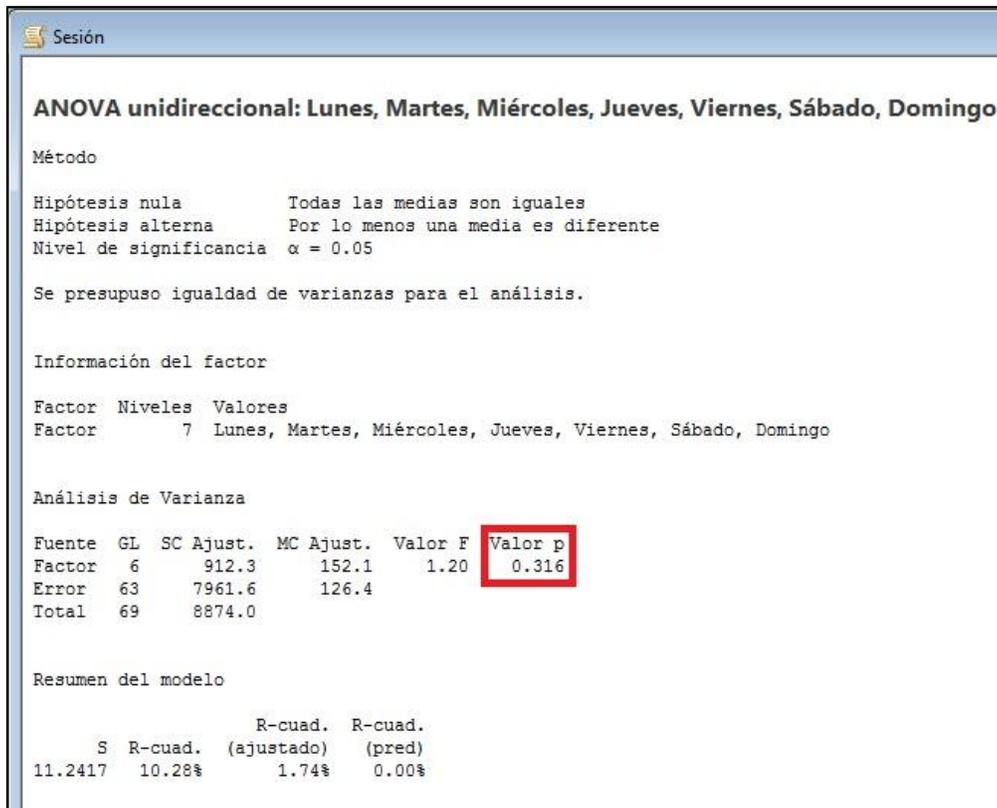
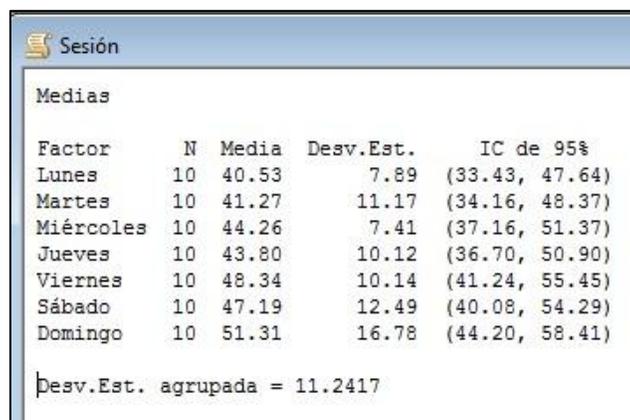


Figura 4. Continuación del desarrollo prueba estadística ANOVA de un solo factor entre las concentraciones de PM_{2,5} obtenidos en cada uno de los días de la semana.



ANEXO 6: Cálculos estadísticos realizados en Minitab 17 para la sección “Comportamiento de la concentración de PM_{2,5} en relación a los puntos de monitoreo”.

Figura 1. Desarrollo prueba estadística Kruskal Wallis entre las concentraciones de PM_{2,5} obtenidos en cada uno de los puntos de monitoreo.

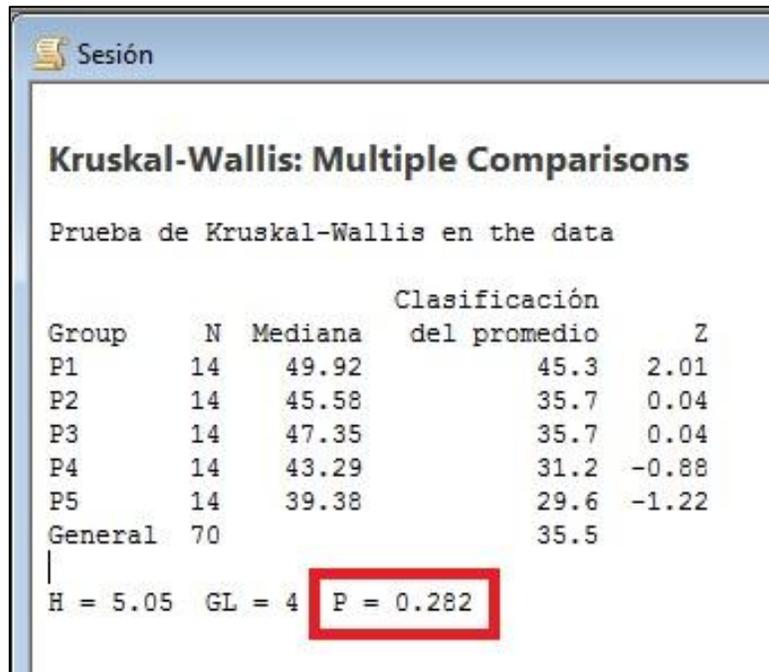


Figura 2. Continuación del desarrollo prueba estadística Kruskal Wallis entre las concentraciones de $PM_{2,5}$ obtenidos en cada uno de los puntos de monitoreo.

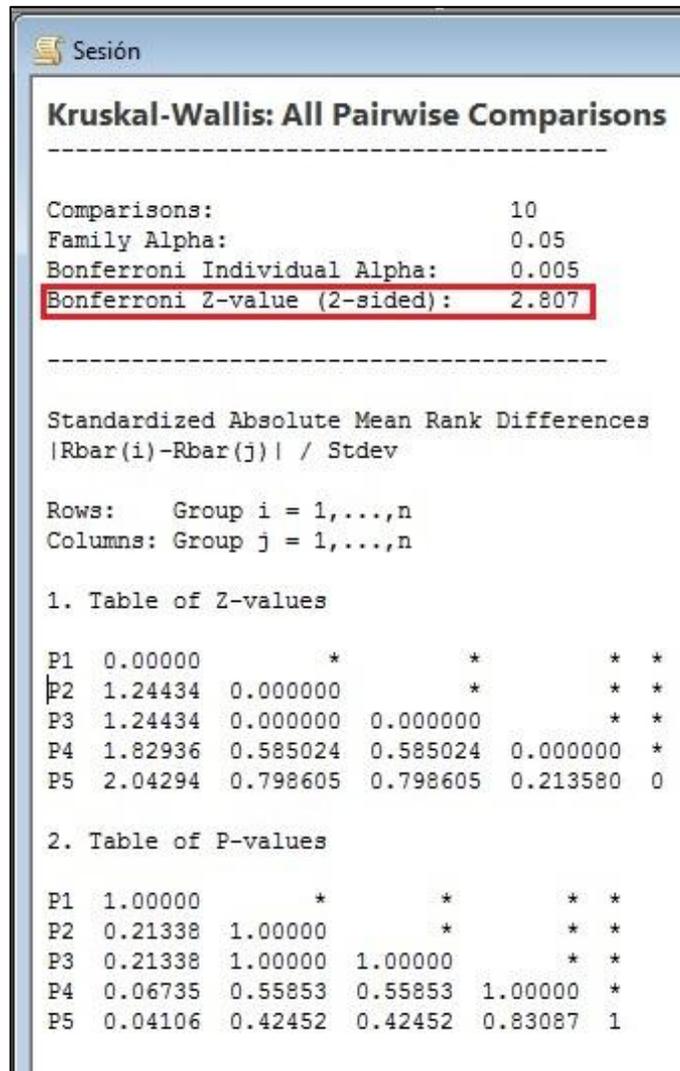


Figura 3. Continuación del desarrollo prueba estadística Kruskal Wallis entre las concentraciones de $PM_{2,5}$ obtenidos en cada uno de los puntos de monitoreo.

Sesión

Sign Confidence Intervals controlled at a family error rate of 0.05

Desired Confidence: 95.284

Intervalo de confianza del signo para la mediana

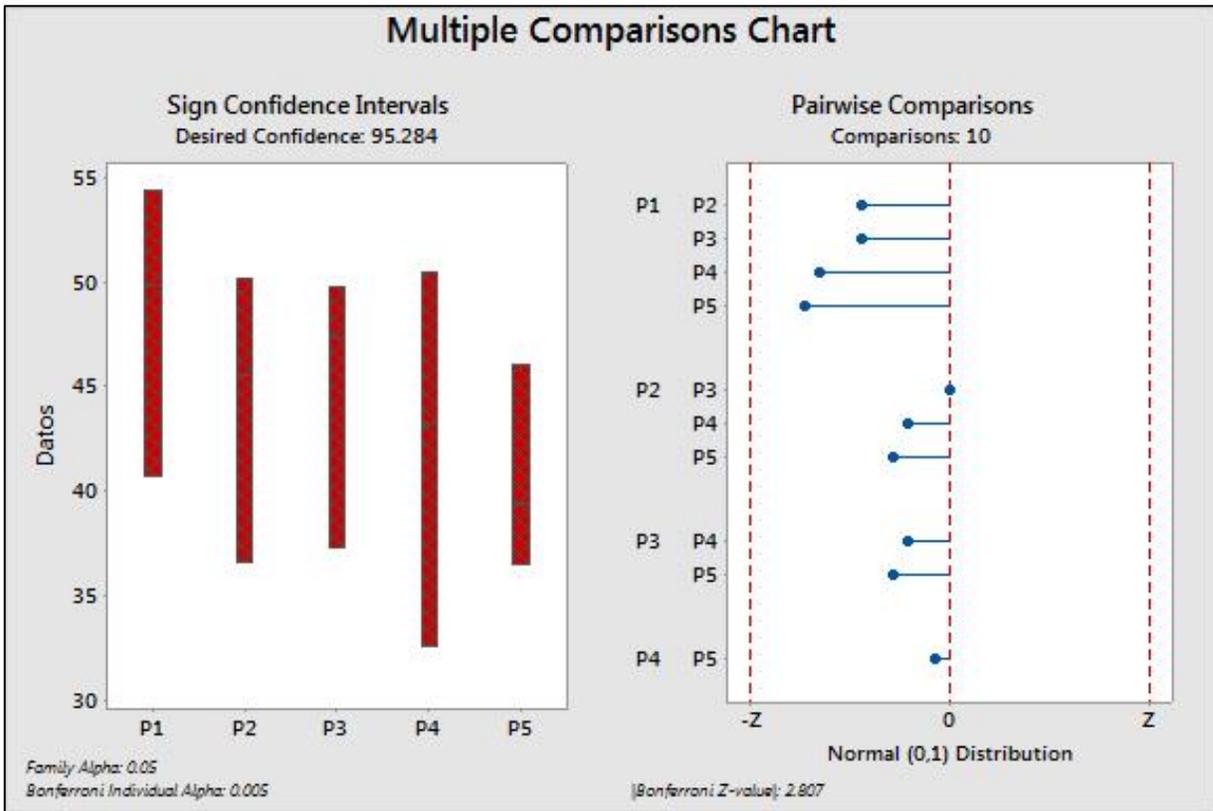
	N	Mediana	Confianza lograda	Intervalo de confianza		Posición
				Inferior	Superior	
P1	14	49.92	0.9426	40.95	54.11	4
			0.9528	40.69	54.41	NLI
			0.9871	37.47	58.11	3
P2	14	45.58	0.9426	36.89	49.92	4
			0.9528	36.62	50.20	NLI
			0.9871	33.24	53.66	3
P3	14	47.35	0.9426	37.35	49.81	4
			0.9528	37.33	49.81	NLI
			0.9871	37.10	49.82	3
P4	14	43.29	0.9426	32.87	49.90	4
			0.9528	32.57	50.47	NLI
			0.9871	28.88	57.46	3
P5	14	39.38	0.9426	36.76	45.79	4
			0.9528	36.47	46.08	NLI
			0.9871	32.95	49.70	3

Figura 4. Conclusión de la prueba estadística Kruskal Wallis entre las concentraciones de $PM_{2,5}$ obtenidos en cada uno de los puntos de monitoreo.

Sesión

Kruskal-Wallis: Conclusions
There were no significant group differences.

Figura 5. Gráfico de comparaciones múltiples de las concentraciones de $PM_{2.5}$ obtenidos en cada uno de los puntos de monitoreo.



ANEXO 7: Álbum fotográfico

Fotografía 1. Muestreo de PM_{2,5} en el punto P1.



Fotografía 2. Muestreo de PM_{2,5} en el punto P2.



Fotografía 3. Muestreo de PM_{2,5} en el punto P3.



Fotografía 4: Muestreo de PM_{2,5} en el punto P4.



Fotografía 5: Muestreo de PM_{2,5} en el punto P5.



Fotografía 6: Balanza analítica del Laboratorio de Ingeniería Ambiental.



Fotografía 7: Desecador.



Fotografía 8: Placas Petri conteniendo filtros con muestra de PM_{2.5}.



Fotografía 9: Manipulación y pesado de filtro con muestra.



Fotografía 10: Limpieza de las piezas del equipo muestreador marca Partisol previo al periodo de monitoreo.



ANEXO 8: Certificado de calibración del equipo muestreador marca Partisol.



Perú
Green Group

Certificado de Calibración

LF - 1112016

Pág. 1 de 1

1. Cliente : UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
2. Dirección : Av. La Molina s/n Lima-Lima-La Molina.

3. Datos del Instrumento

Instrumento de medición : Muestreador de Partículas Marca : Partisol Modelo : 2000-H Código Interno : No indica	Flujo de Trabajo : 16,7 L/min Serie : 2000B207240401 Resolución : 0,1 L/min
--	--

4. Lugar de Calibración: : Laboratorio de flujo de aire - Green Group PE S.A.C.
5. Fecha de Calibración: : 2016-06-21

6. Condiciones Ambientales

	Temperatura	Humedad relativa	Presión atmosférica
Inicial	22,5 °C	58,8 % H.R.	998,2 mbar
Final	22,5 °C	59,0 % H.R.	998,1 mbar

7. Trazabilidad.

Patrón	Código Interno	Nº Lote/Certificado	F. Vencimiento
Patrón primario de flujo de rango alto	GGP-05	5065605	2016-10-09
Termómetro	GGP-02	T-1613-2015	2017-06-22
Barómetro	GGP-02	CP-0160-2015	2017-06-23

8. Método de Calibración.
 Calibración Multipunto de Flujo según manual de fabricante y comparados con patrón trazable.

9. Resultado de Medición.

Patrón	Instrumento	Corrección	Incertidumbre
15,09	15,0	0,09	0,04
16,77	16,7	0,07	0,05
18,20	18,0	0,20	0,05

Obs: Todos los flujos en L/min

Verificación	T (°C)	Patrón	Instrumento
		22,5	22,4
	Press (atm)	746,3	746

10. Observaciones:

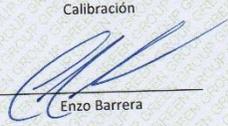
1) La precisión del control de flujo del instrumento es de $\pm 4\%$ del valor seteado.

La incertidumbre de medición expandida reportada es la incertidumbre de medición estándar multiplicada por el factor de cobertura $k=2$ de modo que la probabilidad de cobertura corresponde aproximadamente a un nivel de confianza del 95%. Los resultados emitidos son válidos solo para el instrumento y filtro adecuado, en el momento de la calibración. Se recomienda al usuario recalibrar a intervalos adecuados, los cuales deben ser elegidos con base a las características del instrumento. La incertidumbre declarada en el presente certificado ha sido estimado siguiendo las directrices de: "Guía para la expresión de la incertidumbre de medida" primera edición, septiembre 2008 CEM. El certificado de calibración solo puede ser difundido completamente y sin modificaciones, sin firma y sellos carecen de validez.

Fecha de Emisión

2016-06-22

Jefe de Laboratorio de Calibración



Enzo Barrera



Av. Aviación 4210 - Surquillo

Central: 560-8134 / 273-3550

www.greengroup.com.pe

FO-[LC-PR-01]-03

"EL USO INDEBIDO DE ESTE CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN CONSTITUYE DELITO SANCIONADO CONFORME A LEY"

ANEXO 9: Esquema de flujo del funcionamiento del equipo muestreador marca Partisol.

