

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

LA MOLINA

FACULTAD DE CIENCIAS



“ANÁLISIS DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL MATERIAL PARTICULADO FINO (PM2.5) EN EL AIRE AMBIENTAL DEL CAMPUS DE LA UNALM”

Presentado por:

CESAR MANUEL LLANOS PUGA

Tesis para Optar el Título Profesional de:

INGENIERO AMBIENTAL

Lima – Perú

2017

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

LA MOLINA

FACULTAD DE CIENCIAS

**“ANÁLISIS DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL MATERIAL
PARTICULADO FINO (PM2.5) EN EL AIRE AMBIENTAL DEL
CAMPUS DE LA UNALM”**

Presentado por:

César Manuel Llanos Puga

Tesis para Optar el Título Profesional de:

INGENIERO AMBIENTAL

Sustentado y Aprobado por el siguiente jurado:

Mg.Quím. Mary Flor Césare Coral
PRESIDENTE

Ph.D. Lizardo Visitación Figueroa
MIEMBRO

Ing. Franklin Unsihuay Tovar
MIEMBRO

Ph.D. Sergio Pacsi Valdivia
ASESOR

DEDICATORIA

A mis padres, César y Rudy, quienes por ellos estoy donde estoy.

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, especialmente a mis padres César y Rudy, por el apoyo brindado que me permitió culminar una etapa en mi vida y me motivan a seguir adelante.

A mi compañero Federico Murriel, por sus consejos dados a nivel científico y personal y por su apoyo incondicional que me permitieron seguir adelante con el desarrollo de la presente tesis.

Al Ph. D. Sergio Pacsi Valdivia, asesor de la presente investigación, por la confianza depositada en mí, por el tiempo brindado y por los conocimientos transferidos durante la elaboración de esta tesis.

A la Mg. Quim. Mary Flor Césare Coral, al Ph. D. Lizardo Visitación Figueroa y al Ing. Franklin Unsihuay Tovar, por su disponibilidad y por las críticas constructivas hechas con la finalidad de permitirme realizar un buen trabajo de investigación.

A Edgar Giraldo y a la Ing. Vilma Morales, cuya ayuda desinteresada significó mucho para mí durante todo este proceso.

RESUMEN

La presente investigación determina la composición química del $PM_{2.5}$ en el aire ambiental del campus de la UNALM. Para ello, se trabajó con muestras de $PM_{2.5}$ colectadas entre julio y setiembre del 2016 en cinco puntos estratégicos del campus de la UNALM utilizando un muestreador activo de bajo volumen modelo PARTISOL. La composición química se determinó en términos de contenido total de metales, analizados mediante Espectrometría de emisión atómica de plasma acoplado inductivamente (ICP-AES por sus siglas en inglés), y de aniones (nitrato y sulfato), analizados mediante un Cromatógrafo Iónico. Los resultados obtenidos mostraron que el metal predominante en el $PM_{2.5}$ de la zona es el sodio mientras que en el caso de aniones la concentración de sulfato resalta sobre la de nitrato. Si bien la concentración de los componentes químicos del $PM_{2.5}$ de la zona no es de carácter alarmante, se pudo identificar que el punto de monitoreo más cercano a la avenida principal (Av. La Molina) fue el que presentó la mayor concentración de metales y de aniones pese a no haber presentado la mayor concentración de $PM_{2.5}$, confirmando la necesidad de realizar investigaciones como la que se presenta para entender completamente los impactos que el material particulado pueda ocasionar. Además, analizando el comportamiento local de las variables meteorológicas, se identificó que la radiación solar y la concentración de nitrato presentan un comportamiento similar y que el viento puede tener influencia sobre la concentración de componentes químicos del $PM_{2.5}$ debido al transporte de masas de aire que genera. Por otro lado, entre los posibles orígenes de contaminación que influyen en la composición química del $PM_{2.5}$ de la zona se tiene al levantamiento de polvo de áreas con terreno descubierto o campos de cultivo, a las emisiones provenientes del parque automotor (basándose en el contenido y la distribución espacial de los metales) e inclusive aerosoles marinos.

Palabras clave: $PM_{2.5}$, composición química, metales, aniones

ABSTRACT

This research determines the chemical composition of the PM_{2.5} in the environmental air of the UNALM campus. For this purpose were used PM_{2.5} samples collected with a low volume sampler model PARTISOL between July and September of 2016 on five strategic sites inside the UNALM campus. The chemical composition was determined in terms of total metal content analyzed by Inductively coupled plasma atomic emission spectroscopy (ICP-AES) and anion content (nitrate and sulfate) analyzed by Ion Chromatography. The results obtained showed that the predominant metal in the local PM_{2.5} is sodium while in the case of anions the sulfate concentration stands out on the nitrate concentration. Even though the concentration of the chemical components of the local PM_{2.5} is not alarming it was identified that the closest monitoring site to the main avenue (Av. La Molina) was the one that showed the biggest concentration of metals and anions besides it did not presented the biggest PM_{2.5} concentration confirming the necessity to perform researches like this one presented to fully understand the impacts that the particulate matter can generate. Furthermore, analyzing the local behavior of the meteorological variables, it was identified that solar radiation and nitrate concentration show a similar behavior and that the wind might have influence over the concentration of the chemical components of the PM_{2.5} because of the transport of air masses that it generates. On the other hand, among the possible origins of pollution that influence over the local chemical composition of the PM_{2.5} we have resuspension of soil dust from areas with uncovered land or farmlands, emissions from traffic (based on the content and spatial distribution of metals) and also marine aerosols.

Key words: PM_{2.5}, chemical composition, metals, anions

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
I. INTRODUCCIÓN	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
2.1. Material particulado con diámetro aerodinámico menor a 2.5 micras.....	4
2.2. Composición química del PM _{2.5}	5
2.2.1. Contenido metálico del PM _{2.5}	7
2.2.2. Aniones en el PM _{2.5}	8
2.3. Variables meteorológicas que afectan la composición química del PM _{2.5}	9
2.3.1. Radiación solar.....	9
2.3.2. Viento	10
2.3.3. Otras variables.....	11
2.4. Situación de la concentración de PM _{2.5}	12
III. MATERIALES Y MÉTODOS	14
3.1. Materiales.....	14
3.1.1. Para el monitoreo de PM _{2.5}	14
3.1.2. Para la determinación de la composición química del PM _{2.5}	14
3.2. Zona de Estudio	15
3.3. Determinación de la concentración de PM _{2.5}	19
3.4. Análisis de la concentración de los componentes químicos en el PM _{2.5}	22
3.4.1. Concentración de metales en el PM _{2.5}	22
3.4.2. Concentración de aniones en el PM _{2.5}	26
3.4.3. Análisis integral de la composición química del PM _{2.5}	28
3.5. Análisis de la influencia de variables meteorológicas sobre la composición química del PM _{2.5}	29
3.5.1. Análisis de la influencia de la radiación solar sobre la composición química del PM _{2.5}	29
3.5.2. Análisis de la influencia del viento sobre la composición química del PM _{2.5}	29
3.5.3. Análisis de la influencia de otras variables meteorológicas sobre la composición química del PM _{2.5}	29

3.6. Identificación de posibles orígenes de contaminación que influyan en la composición química del PM _{2.5}	30
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	31
4.1. Determinación de la concentración de PM _{2.5}	31
4.2. Análisis de la concentración de los componentes químicos en el PM _{2.5}	32
4.2.1. Concentración de metales en el PM _{2.5}	32
4.2.2. Concentración de aniones en el PM _{2.5}	52
4.2.3. Análisis integral de la composición química del PM _{2.5}	55
4.3. Análisis de la influencia de variables meteorológicas sobre la composición química del PM _{2.5}	57
4.3.1. Análisis de la influencia de la radiación solar sobre la composición química del PM _{2.5}	57
4.3.2. Análisis de la influencia del viento sobre la composición química del PM _{2.5}	58
4.3.3. Análisis de la influencia de otras variables meteorológicas sobre la composición química del PM _{2.5}	60
4.4. Identificación de posibles orígenes de contaminación que influyan en la composición química del PM _{2.5}	61
V. CONCLUSIONES	69
VI. RECOMENDACIONES	71
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72
VIII. ANEXOS	78

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Valores de referencia sobre metales en el PM _{2.5} (ug/m ³).....	6
Tabla 2. Puntos de monitoreo.....	20
Tabla 3. Intensidad de relación de acuerdo al valor del coeficiente “r”.....	25
Tabla 4. Filtros seleccionados conforme a concentración de PM _{2.5}	32
Tabla 5. Concentración de metales en el PM _{2.5}	33
Tabla 6. Filtros seleccionados conforme a radiación solar.....	52
Tabla 7. Concentración de nitrato y sulfato muestras.....	53
Tabla 8. Concentración promedio de nitrato y sulfato en el PM _{2.5}	53
Tabla 9. Composición química del PM _{2.5} en Taian y Lima (ug/m ³).....	56
Tabla 10. Resultados de pruebas de correlación con metales.....	65

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Vista aérea del entorno del campus de la UNALM.....	17
Figura 2. Avenidas y calles en el entorno del campus de la UNALM.	18
Figura 3. Puntos de monitoreo.....	21
Figura 4. Cronograma de monitoreo de PM _{2.5}	22
Figura 5. Concentración promedio de PM _{2.5} por punto de monitoreo.....	31
Figura 6. Contenido total metálico del PM _{2.5} por punto de monitoreo.....	34
Figura 7. Concentración de metales en P1.....	35
Figura 8. Concentración de metales en P2.....	35
Figura 9. Concentración de metales en P3.....	36
Figura 10. Concentración de metales en P4.....	36
Figura 11. Concentración de metales en P5.....	37
Figura 12. Concentración de sodio (Na) por punto de monitoreo.....	38
Figura 13. Concentración de silicio (Si) por punto de monitoreo.....	39
Figura 14. Concentración de calcio (Ca) por punto de monitoreo.....	39
Figura 15. Concentración de potasio (K) por punto de monitoreo.....	40
Figura 16. Concentración de fósforo (P) por punto de monitoreo.....	40
Figura 17. Concentración de hierro (Fe) por punto de monitoreo.....	41
Figura 18. Concentración de magnesio (Mg) por punto de monitoreo.	42
Figura 19. Concentración de aluminio (Al) por punto de monitoreo.	42
Figura 20. Concentración de zinc (Zn) por punto de monitoreo.	43
Figura 21. Concentración de plomo (Pb) por punto de monitoreo.	44
Figura 22. Concentración de manganeso (Mn) por punto de monitoreo.....	45
Figura 23. Concentración de cobre (Cu) por punto de monitoreo.....	46
Figura 24. Concentración de titanio (Ti) por punto de monitoreo.....	46

Figura 25. Concentración de cromo (Cr) por punto de monitoreo.....	47
Figura 26. Concentración de bario (Ba) por punto de monitoreo.....	48
Figura 27. Concentración de níquel (Ni) por punto de monitoreo.....	48
Figura 28. Concentración de vanadio (V) por punto de monitoreo.....	49
Figura 29. Concentración de molibdeno (Mo) por punto de monitoreo.....	49
Figura 30. Concentración de estroncio (Sr) por punto de monitoreo.....	50
Figura 31. Líneas de concentración de metales con forma de “W”.....	51
Figura 32. Líneas de concentración del Ni y V.....	51
Figura 33. Concentración promedio de nitrato y sulfato por punto de monitoreo.....	54
Figura 34. Concentración total de aniones por punto de monitoreo.....	54
Figura 35. Relación del nitrato y la radiación solar.....	57
Figura 36. Relación del sulfato y la radiación solar.....	58
Figura 37. Rosa de vientos correspondiente al periodo de monitoreo.....	59
Figura 38. Zonas identificadas en el entorno del campus de la UNALM.....	62
Figura 39. Rosa de vientos a mayor escala.....	64
Figura 40. Concentración de metales relacionada a días de monitoreo.....	66

ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1. Cálculos para la determinación de la concentración promedio de $PM_{2.5}$	78
Anexo 2. Resultados de análisis de laboratorio para la determinación del contenido metálico del $PM_{2.5}$	79
Anexo 3. Cálculos para la determinación de la concentración de metales en el $PM_{2.5}$ en el punto P1.....	85
Anexo 4. Cálculos para la determinación de la concentración de metales en el $PM_{2.5}$ en el punto P2.....	86
Anexo 5. Cálculos para la determinación de la concentración de metales en el $PM_{2.5}$ en el punto P3.....	87
Anexo 6. Cálculos para la determinación de la concentración de metales en el $PM_{2.5}$ en el punto P4.....	88
Anexo 7. Cálculos para la determinación de la concentración de metales en el $PM_{2.5}$ en el punto P5.....	89
Anexo 8. Cálculos para la determinación de la concentración de nitratos en el $PM_{2.5}$	90
Anexo 9. Cálculos para la determinación de la concentración de sulfatos en el $PM_{2.5}$	90
Anexo 10. Datos meteorológicos de la Estación Meteorológica Alexander Von Humboldt correspondientes al periodo 04-Jul a 10-Set del 2016.....	91
Anexo 11. Álbum fotográfico.....	93

I. INTRODUCCIÓN

El material particulado (PM por sus siglas en inglés) es un componente importante del aire ambiental debido a sus efectos significativos sobre la calidad del aire, la salud humana, la visibilidad regional y el cambio climático global (Zhang et al., 2016). En la ciudad de Lima – Perú, solamente por exposición al material particulado, mueren más de 6000 personas al año y los gastos por salud debido a tal exposición representan aproximadamente 300 millones de dólares (MINAM, 2011). Las fracciones más finas, como el PM_{2.5} (material particulado con diámetro aerodinámico menor a 2.5 micras), llaman más la atención de la comunidad científica puesto que estas pueden permanecer en suspensión por tiempos prolongados (Pateraki et al., 2014). Sumado a ello, el PM_{2.5} posee una gran área superficial que facilita el transporte de virus, bacterias y componentes tóxicos que pueden ser inhalados por el sistema respiratorio humano, penetrar hasta los alveolos y generar enfermedades respiratorias y cardiovasculares (Chen et al., 2014).

Según Liu et al. (2015), la composición química del PM_{2.5} es la llave para entender y evaluar completamente los impactos que este genera en el clima, la calidad del aire y la salud humana. Así por ejemplo, los metales pesados contenidos en el PM_{2.5} presentan efectos negativos a la salud humana debido a que son generadores de alergias respiratorias y potenciales cancerígenos (Zhai et al., 2014); mientras que aniones como el sulfato y el nitrato pueden ayudar a identificar si los orígenes de contaminación provienen de combustiones ya sean industriales o vehiculares (Liu et al., 2015).

Considerando lo mencionado, diversos métodos para la determinación de la concentración de material particulado en el aire se han venido desarrollando a lo largo de los años. La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA por sus siglas en inglés) reconoce al método de muestreo activo gravimétrico de bajo volumen y al método de

muestreo activo gravimétrico de alto volumen como métodos de referencia para la determinación de la concentración de $PM_{2.5}$ en el aire (USGPO 2016). En base a ello, la Dirección General de Salud Ambiental (DIGESA) realizó en el año 2011 el II Estudio de Saturación de Calidad del Aire en Lima-Callao y determinó que la zona correspondiente a Lima Este (que incluye al distrito de La Molina) presentaba niveles de concentración promedio de $PM_{2.5}$ mayores a 40 ug/m^3 , valores que inclusive superaron a los registrados en la zona denominada como Lima Ciudad. Además, considerando al Estándar Nacional de Calidad Ambiental actual para $PM_{2.5}$ (25 ug/ m^3), tales concentraciones halladas resultan de carácter alarmante y precisan de estudios especiales.

Según Khan et al. (2009), el estudio de la masa y de la composición química del material particulado puede proveer, en conjunto, información eficiente de las propiedades físicas y químicas, de los mecanismos de formación y de las fuentes, lo que es esencial y de carácter significativo para incluir en estrategias de control del mismo, tanto a nivel local como regional. Además, tomando en cuenta los efectos adversos que pueden generar en la salud ciertos constituyentes químicos contenidos en el $PM_{2.5}$, la falta de información referente a dichos componentes no debería presentarse en ciudades propensas a contaminación atmosférica, como lo es la ciudad de Lima.

En tal contexto se decidió realizar el estudio de la composición química del $PM_{2.5}$ en el aire ambiental, escogiéndose a la Universidad Nacional Agraria La Molina (de ahora en adelante UNALM), ubicada en el distrito La Molina, como zona de muestreo. Ello debido a que la UNALM se encuentra ubicada dentro de la zona Lima Este (zona con niveles alarmantes de $PM_{2.5}$ según el estudio de la DIGESA en el año 2011) y que además se presenta como una zona adecuada para estudios sobre calidad de aire pues dentro de su campus alberga a la Estación Meteorológica Alexander Von Humboldt, la cual brinda accesibilidad a datos meteorológicos que complementan la presente investigación ya que, según DIGESA (2005), es altamente recomendable que el monitoreo de la calidad del aire esté acompañado por un apropiado monitoreo meteorológico.

La presente investigación tiene un objetivo principal, el cual a su vez desencadena tres objetivos específicos.

Objetivo Principal

- Analizar la composición química del material particulado con diámetro aerodinámico menor a $PM_{2.5}$ micras ($PM_{2.5}$) en el aire ambiental del campus de la UNALM.

Objetivos Específicos

- Evaluar la concentración y la distribución espacial en el aire ambiental de 31 metales (incluyéndose dentro de este grupo a los metaloides arsénico, boro, silicio y antimonio) y de aniones como el nitrato y el sulfato.
- Analizar la influencia de la radiación solar, la velocidad y la dirección del viento y otras variables meteorológicas como precipitación, humedad relativa y temperatura sobre la composición química del $PM_{2.5}$.
- Identificar posibles orígenes de contaminación que influyan en la composición química del $PM_{2.5}$.

Cumpliendo con tales objetivos, el presente trabajo es el primer estudio en reportar la composición química del $PM_{2.5}$ en el aire ambiental de la UNALM.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Material particulado con diámetro aerodinámico menor a 2.5 micras

El término Material Particulado (PM) es utilizado para describir a partículas sólidas o líquidas que se transportan y dispersan en la atmósfera. Dichas partículas varían en forma, tamaño, área superficial y composición química, lo que les da diferentes propiedades (Contini et al., 2014). La investigación en torno al PM_{2.5} (material particulado fino con diámetro aerodinámico menor a 2.5 micras) ha tomado importancia en el campo científico debido a que el tamaño pequeño de estas partículas les da la capacidad de penetrar al sistema respiratorio hasta nivel alveolar donde quedan retenidas en los pulmones generando efectos adversos en la salud como asma, enfermedades cardiopulmonares y cáncer pulmonar (Jiang et al., 2015).

En cuanto a fuentes emisoras, el material particulado fino es principalmente producido por procesos de combustión, quema de materia orgánica y transformación de especies gaseosas en el aire (Contini et al., 2014). A manera general, la contaminación atmosférica es causada por dos factores: la emisión de contaminantes a la baja atmósfera y las condiciones meteorológicas favorables (Zhang et al., 2015). Cabe resaltar que en zonas urbanas la fuente predominante de emisión de material particulado a la atmósfera es la quema de combustibles fósiles, por lo que con el desarrollo de la industrialización y el incremento del parque automotor las concentraciones de este contaminante en el aire ambiental podrían aumentar si no se toman medidas adecuadas.

Por otra parte, los estudios sobre el PM_{2.5} abarcan generalmente un estudio del comportamiento local de las variables meteorológicas, pues se ha comprobado que

estas influyen sobre la concentración de PM en el aire. Así por ejemplo, Glavas et al. (2008) y Zhang et al. (2015) reportaron que en los días lluviosos las concentraciones de PM_{2.5} fueron menores ya que la caída de las partículas aumenta al ser atrapadas por las gotas de lluvia, Pu et al. (2011) reportaron que con el incremento de humedad las concentraciones de PM_{2.5} aumentan, y Zhang et al. (2015) reportaron que un incremento en la velocidad del viento conduce a la propagación y eliminación zonal de contaminantes del aire como el PM_{2.5}.

Debido a los efectos sobre la salud y el ambiente conocidos que genera el PM_{2.5}, diversos métodos de monitoreo han sido desarrollados para identificar su concentración en la atmósfera. La legislación peruana, mediante el Decreto Supremo N° 003-2008-MINAM, indica que el método de análisis correspondiente al parámetro PM_{2.5} es el gravimétrico y que el periodo de monitoreo es 24 horas, mas no se especifica el flujo de aire a utilizar para el muestreo (alto volumen o bajo volumen). En cuanto a los filtros a utilizar para el muestreo, varían en tamaño dependiendo del equipo que se utilice y en tipo de material dependiendo los fines para los que se requiera.

2.2. Composición química del PM_{2.5}

Identificar solamente la masa del material particulado no provee un entendimiento claro de los efectos adversos a la salud humana que este genera, por ello la comunidad científica viene dando énfasis a la composición química del material particulado y sus propiedades asociadas (Khan et al., 2009). Diversos estudios (Pateraki et al., 2014; Wang et al., 2014; Khan et al., 2009; SEMARNAT, 2011) concuerdan que el principal componente del PM son los aerosoles secundarios inorgánicos (sulfatos, nitratos y amonio), seguido de compuestos orgánicos y de iones inorgánicos como metales pesados (provenientes generalmente de procesos de combustión) o componentes del suelo (como Ca²⁺ o Mg²⁺). Cabe resaltar, que la composición química del PM_{2.5} de una determinada zona dependerá altamente de las fuentes de emisión circundantes y del comportamiento de la atmósfera local.

Así, las personas están expuestas a contaminantes atmosféricos de diversas formas que pueden llevar a riesgos a la salud, como por ejemplo: respiración de aire contaminado, deposición de contaminantes químicos en la piel, ingesta de alimentos y agua con ocurrencia de deposición de contaminantes químicos provenientes de aire contaminado, entre otros (Geiger y Cooper, 2010).

En cuanto a valores referenciales, Geiger y Cooper (2010) recopilan en su investigación valores de referencia en cuanto a metales en el material particulado del aire y en base a ello se ha elaborado la tabla 1, donde se observan valores que pueden servir para determinar si una zona está expuesta o no a efectos negativos por parte de la composición metálica del PM. En cuanto a aniones en el PM_{2.5} no existe en la actualidad valores referenciales específicos para ellos; sin embargo, estos pueden servir como indicadores de ocurrencia de gases atmosféricos dañinos a la salud humana como NO₂ o SO₂.

Tabla 1. Valores de referencia sobre metales en el PM_{2.5} (ug/m³)

Metal	Símbolo	Valores típicos en el aire ambiental ^a		USEPA
		Rural	Urbano	RC ^b
Antimonio	Sb	< 0.001	0.032	-
Arsénico	As	0.002	0.02	0.00057
Berilio	Be	0.0001	0.002	0.001
Cadmio	Cd	0.001	0.008	0.0014
Cromo	Cr	0.002	0.02	-
Cobalto	Co	0.0001	0.0005	0.00027
Cobre	Cu	0.01	0.29	-
Hierro	Fe	0.3	1.6	-
Plomo	Pb	0.02	0.04	0.03
Manganeso	Mn	0.001	0.02	-
Mercurio	Hg	0.0001	0.014	-
Níquel	Ni	0.006	0.02	0.01
Selenio	Se	0.0001	0.015	-
Plata	Ag	0.0005	0.004	-
Vanadio	V	0.0008	0.065	0.1
Zinc	Zn	0.006	0.103	-

Fuente: Geiger y Cooper, 2010

^a Valor típico en el material particulado del aire ambiental de Estados Unidos.

^b Valor mínimo de riesgo de cáncer (1 en un millón).

2.2.1. Contenido metálico del PM_{2.5}

Los metales son encontrados naturalmente en el ambiente a bajos niveles y algunos son nutrientes esenciales para los humanos; sin embargo, ciertos tipos de metales y metales a altas concentraciones pueden tener efectos adversos a la salud humana y al ambiente (Geiger y Cooper, 2010).

El contenido metálico del PM_{2.5} es, probablemente, el principal causante de los efectos a la salud que este genera. La mayoría de metales se absorben en la superficie del material particulado y una vez que son aspirados por el sistema respiratorio humano son liberados causando un gran daño a la salud (Zhai et al., 2014). Especialmente los metales de transición, debido a sus propiedades redox, juegan un rol importante en el daño oxidativo al sistema cardiopulmonar, llevando a toxicidad celular y probabilidad de ocurrencia de cáncer (Jiang et al., 2015). Geiger y Cooper (2010) resaltan al Sb, As, Be, Cd, Cr, Co, Pb, Mn, Hg, Ni y Se como contaminantes atmosféricos peligrosos y al Cu, Fe, Ag, Tl, V y Zn como contaminantes atmosféricos de preocupación.

Distintos autores han encontrado que la concentración de metales pesados en el PM_{2.5} es enriquecida por diferentes fuentes incluyendo al suelo, el polvo, los procesos industriales, la emisión de vehículos, la combustión de carbón, etc. (Chen et al., 2014). Tal contenido dependerá de la zona en estudio.

Jiang et al. (2015) indican que en la atmósfera urbana, diferentes fuentes de emisión contribuyen al contenido metálico del material particulado atmosférico, por ejemplo: el desgaste de las llantas por la acción de frenar el automóvil, el humo que emanan los vehículos y hasta el polvo que se alza de la carretera. En su estudio detallado, se identificó al Na, K, Al, Fe y Zn como los más abundantes; al Ca, Pb, Mg, Cu, Mn, V, Ni y Cr como los de concentración intermedia, y al Cd, Mo y Co como los de concentración menor; relacionando además a todos ellos con el uso de

combustibles fósiles (quema de aceites, carbón, derivados del petróleo) y, en ciertos casos, con la composición de la corteza terrestre local.

Por otra parte, Liu et al. (2015) consideran al Mg, Al, K, Si, Na, Ca y Fe como elementos de corteza; pero ello no exime que concentraciones altas de dichos elementos puedan ser reportadas debido a actividades antropogénicas. Machado et al. (2008) concluyeron en su estudio realizado en Venezuela que los metales Ni, Pb, Cr y Zn son emitidos a la atmósfera principalmente por el parque automotor; Contini et al. (2014) asocian también al V y al Cd a la misma fuente.

El Grupo de Ingeniería Química de la Universidad del País Vasco realizó un estudio en España en el 2006 en donde se deduce que el contenido metálico del material particulado y la masa del material particulado son directamente proporcional, ya que ambos presentan concentraciones mayores en los mismos días, siendo estos generalmente días intermedios de semana.

2.2.2. Aniones en el PM_{2.5}

Los aniones solubles en agua, principalmente nitrato y sulfato, son componentes importantes del material particulado y numerosos métodos han sido desarrollados para su determinación, predominando el uso de la cromatografía iónica (Baltensperger y Hertz, 1985).

Khan et al. (2009) y Wang et al. (2014) concuerdan en que los aniones más abundantes presentes en el PM_{2.5} son sulfato (SO₄²⁻) y nitrato (NO₃⁻). SEMARNAT (2011) indica que los principales gases precursores de tales aniones son el dióxido de azufre (SO₂), los óxidos de nitrógeno (NO_x) y el amoníaco (NH₃). Entonces, el estudio de dichos aniones puede dar indicios de presencia de los gases mencionados, los cuales según la Organización Mundial de la Salud (OMS) tienen

efectos comprobados adversos a la salud afectando principalmente al sistema respiratorio y aumentando la probabilidad de mortalidad.

SEMARNAT (2011) indica que el sulfato se origina principalmente de la oxidación del SO₂, pero también su contenido puede ser derivado de la sal de los mares; además indica que el nitrato se presenta en la forma de nitrato de amonio (NH₄NO₃) o nitrato de sodio (NaNO₃). Por su parte, el ion cloruro (Cl⁻) se presenta en el material particulado cuando la zona es influenciada por masas de aire provenientes del mar (Kouyoumdjian y Saliba, 2006).

La concentración de nitrato, sulfato, cloruro y amonio en los aerosoles varía debido a cambios en las condiciones meteorológicas, en el interior de las partículas y en las interacciones gas-partícula (Kouyoumdjian y Saliba, 2006). Glavas et al. (2008) concluyeron a partir de su estudio que los aniones en el PM se ven influenciados básicamente por tres fuentes: masas de aire conteniendo contaminantes antropogénicos, agua de mar y polvo.

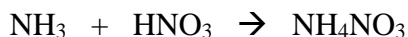
2.3. Variables meteorológicas que afectan la composición química del PM_{2.5}

2.3.1. Radiación solar

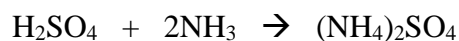
Kouyoumdjian y Saliba (2006) indican que la radiación solar contribuye a la ocurrencia de reacciones fotoquímicas en la atmósfera y por ende a la formación de altos niveles de contaminantes secundarios. Así, por ejemplo, mencionan que ciertos niveles de radiación son necesarios para la oxidación fotoquímica de compuestos orgánicos que permite la formación de radicales OH, los cuales son precursores de HNO₃. Este HNO₃ servirá luego como precursor de NH₄NO₃. De ello se resalta la importancia de la radiación como factor de formación de nitratos en la atmósfera.



Khan et al. (2009) reportaron que a baja temperatura y atmósfera estable se favorece la formación de nitratos. Ello se corrobora con la investigación de Glavas et al. (2008), donde se indica que en meses fríos ocurre la siguiente reacción



Por otra parte, Kouyoumdjian y Saliba (2006) y Liu et al. (2015) reportaron que las concentraciones de sulfato en el PM incrementan en días de mayor radiación solar debido a que ocurre mayor fotooxidación de SO_2 , dando lugar a la ocurrencia de la siguiente reacción:



Entonces, se puede observar como la radiación solar juega un papel predominante en la cantidad de nitrato y sulfato en el aire ambiental, siendo así un factor primordial a considerar en la presente investigación. La radiación que recibe una superficie es expresada en ly/día .

2.3.2. Viento

La velocidad del viento determina el grado de dilución y dispersión de los contaminantes, mientras que la dirección del viento determina la dirección del transporte de los mismos (Pu et al., 2011). El material particulado fino, al tener tiempos de residencia mayores en la atmósfera, está altamente influenciado por el transporte que pueden generar las masas de aire, como lo indica Pillai et al. (2006).

Glavas et al. (2008) identificaron al origen de las masas de aire como un factor principal que afecta a los niveles del material particulado. Así, dependiendo de la dirección del viento, el $\text{PM}_{2.5}$ se concentrará en zonas determinadas, ocurriendo lo mismo con los contaminantes que lo componen (metales, sulfatos, nitratos, etc.).

Dicha investigación además, identificó tres tipos de origen de masas de aire: sal marina, polvo de la corteza y otros (origen antropogénico). Es importante mencionar que aquellas masas de aire con origen en fuentes antropogénicas son las que requieren de mayor atención pues transportan los contaminantes que afectan directamente a la salud de las personas.

Así, el conocer hacia dónde se dirige el viento, ya sea noreste, sureste, etc., puede ayudar a comprender el por qué ciertas zonas presentan más concentración de material particulado que otras y también a su vez más contaminantes químicos, como metales o aniones solubles, que otras. Tal información se obtiene a partir de la interpretación de rosas de viento, las cuales se elaboran utilizando datos de velocidad de viento (en m/s) y de dirección del viento (en grados sexagesimales).

2.3.3. Otras variables

Glavas et al. (2008) y Zhang et al. (2015) reportaron concentraciones menores de $PM_{2.5}$ en ocasiones que se presentó precipitación; ello debido a que las gotas de lluvia ocasionan la deposición del material particulado sobre la superficie generando un efecto de “lavado” en la atmósfera. Sin embargo, Pu et al. (2011) reportaron que precipitaciones menores a 1 mm no tenían efecto sobre las concentraciones de $PM_{2.5}$ registradas. Entonces, en zonas como la ciudad de Lima en donde las precipitaciones son escasas, el efecto de “lavado” puede no tener efectividad sobre la concentración ambiental del $PM_{2.5}$ y sus componentes químicos.

Por otra parte, Pillai et al. (2002) reportaron que conforme la humedad relativa aumenta, la toma de agua por parte de los aerosoles también aumenta, disminuyendo su densidad y permitiendo que permanezcan en suspensión por más tiempo. En cuanto a la temperatura, a menores valores se favorece la formación de nitrato de amonio, principalmente debido a la ausencia de fotodisociación (Glavas et al., 2008; Khan et al., 2009; Wang et al., 2014).

2.4. Situación de la concentración de PM_{2.5}

Actualmente el estado de la calidad del aire en Lima y el Callao es monitoreado a través de dos instituciones: el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) perteneciente al Ministerio del Ambiente de Perú y que cuenta con nueve estaciones de monitoreo; y la Dirección General de Salud Ambiental e Inocuidad Alimentaria (DIGESA) perteneciente al Ministerio de Salud de Perú y que cuenta con cinco estaciones de monitoreo; justamente esta última institución indica al material particulado, expresado como PM₁₀ y PM_{2.5}, como el principal contaminante atmosférico de Lima (Pacsi, 2016).

Tomando como referencia a la Evaluación del Desempeño Ambiental Perú del 2016 (OCDE, 2016), a nivel país, en el periodo 2013 – 2014 las emisiones de material particulado han aumentado en un 14%. La principal fuente de presión sobre la calidad del aire se asocia con el aumento del parque automotor y el uso de combustibles fósiles. Así, solo en Lima – Callao se registra para el año 2012 un valor de 135 vehículos por cada mil habitantes; y ese valor seguirá creciendo conforme progresa la economía del país y aumente la población de peruanos. Además, el transporte se define como una de las principales causas de problemas ambientales del aire y, considerando que la flota de vehículos del Perú es antigua y con poco mantenimiento, es probablemente el problema más álgido de la contaminación atmosférica a nivel nacional.

Nacionalmente el Decreto Supremo 003-2008-MINAM estipula como Estándar Calidad Ambiental (ECA) para PM_{2.5} al valor de 25 ug/m³ para un periodo de 24 horas (valor coincidente con el establecido por la OMS). Además indica al método gravimétrico como método de referencia para la determinación de concentración de PM_{2.5}, pero no especifica exactamente qué flujo de aire utilizar en el muestreo puesto que, dependiendo del muestreador que se utilice, puede ser de alto volumen (flujo mayor a 0.5 m³/min) o de bajo volumen (flujo menor a 0.5 m³/min) (INDECOPI, 2003). En cuanto a metales en el aire, solo el plomo tiene normativa

definida: 1.5 ug/m^3 como valor mensual (Decreto Supremo N° 074-2001-PCM) y 0.5 ug/m^3 como valor anual (Decreto Supremo N° 069-2003-PCM).

Según el Informe Nacional de la Calidad del Aire 2013-2014 (MINAM, s.f.), las concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$ en Lima y Callao experimentaron desde el año 2007 una tendencia decreciente en las cinco zonas establecidas para el estudio de la calidad del aire: Lima Ciudad, Lima Norte, Lima Este, Lima Sur y Callao; sin embargo, al 2014 zonas como Lima Ciudad, Lima Norte y Lima Este superaban el actual ECA nacional establecido para $\text{PM}_{2.5}$.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Materiales

3.1.1. Para el monitoreo de PM_{2.5}

- Muestreador activo manual de bajo volumen: Partisol Model 2000H Air Sampler (Flujo de 0.0167 m³/min ≈ 16.7 l/min).
- Desecador.
- Balanza Analítica.
- Refrigeradora.
- 37 filtros de fibra de cuarzo de 47 mm de diámetro.
- 37 placas Petri de plástico.
- Pinza.
- Táper de plástico
- Datos de variables meteorológicas obtenidos de la Estación Meteorológica Alexander Von Humboldt.
- Plumón marcador.
- Cinta adhesiva.
- Mandil de laboratorio.

3.1.2. Para la determinación de la composición química del PM_{2.5}

- Espectrometría de emisión atómica de plasma acoplado inductivamente (ICP-AES por sus siglas en inglés).
- Cromatógrafo Iónico.
- Equipo de baño ultrasónico.
- Equipo de succión al vacío.
- Filtro de membrana de 45 µm.

- 11 frascos de plástico.
- 11 tubos de ensayo.
- Agua destilada y agua ultra pura.
- Pinza.
- Plumón marcador.
- Guantes y mandil de laboratorio.

3.2. Zona de Estudio

Lima, capital del Perú, juntamente con Callao presentan un densidad poblacional de 282.5 habitantes/Km², albergando 9 838 251 habitantes de los 31 151 643 peruanos a nivel nacional (aproximadamente 31.6 %) (INEI, 2015). La Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), zona donde se desarrolló la presente investigación, pertenece al distrito de La Molina, provincia de Lima, y está ubicada aproximadamente entre las latitudes 12°04' y 12°05' S y las longitudes 76°57' y 76°56' O. Dentro de sus inmediaciones alberga a la Estación Meteorológica Alexander Von Humboldt, la cual reporta diariamente datos relacionados a la meteorología de la zona.

La UNALM pertenece a la zona Lima Este (zona en donde el ECA para PM_{2.5} es superado). Esta zona presenta temperaturas que alcanzan su valor máximo en verano (alrededor de 27 °C) y su mínimo en invierno (alrededor de 13 °C), humedad relativa con un valor máximo en invierno (98%) y un mínimo en verano (53%), precipitaciones mayores en invierno, velocidades de viento mayores en verano (alrededor de 9 m/s) y menores en invierno (alrededor de 7 m/s), y dirección media del viento Oeste (SENAMHI, 2011).

En cuanto a los espacios físicos que colindan con la UNALM, y que probablemente sean de gran influencia en el PM_{2.5} presente en el aire ambiental, se pueden identificar cerros (que posiblemente funcionen como encapsuladores del material particulado en el aire ambiental), zonas urbanas (por ende tránsito vehicular) y

áreas verdes, como se puede observar en la figura 1. Debe tenerse en cuenta también que, como se mencionó anteriormente, el viento puede influir a través del transporte de contaminantes desde zonas alejadas a donde se realice el monitoreo.

Por otra parte, en la figura 2 se muestran las principales calles que rodean al campus de la UNALM, resaltando las vías principales denominadas Av. Javier Prado Este, Av. La Molina y Av. Raúl Ferrero.



Figura 1. Vista aérea del entorno del campus de la UNALM

Fuente: Propia, utilizando el *software* Google Earth y el *software* versión de prueba ArcGIS.

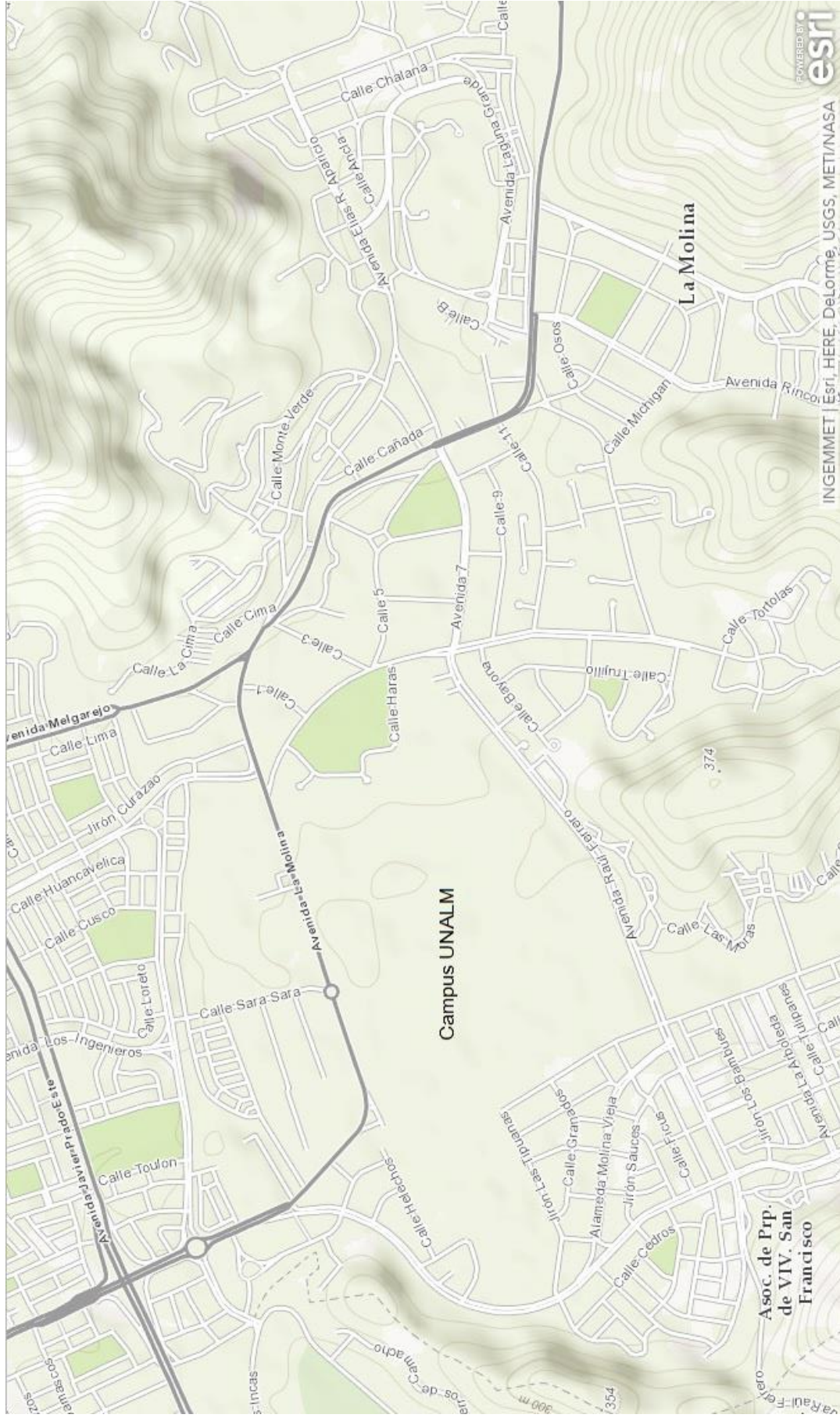


Figura 2. Avenidas y calles en el entorno del campus de la UNALM

Fuente: Extraído de <http://www.ingemmet.gob.pe/carta-geologica-nacional>

3.3. Determinación de la concentración de PM_{2.5}

Las muestras que se utilizaron para la determinación de la concentración de PM_{2.5} y posterior determinación de su composición química se obtuvieron de un trabajo de investigación ejecutado por un tercero. Cabe resaltar que se tuvo una participación activa en el trabajo de investigación mencionado a fin de asegurar la trazabilidad de las muestras.

El monitoreo del PM_{2.5} se ejecutó utilizando un muestreador activo manual de bajo volumen modelo Partisol Model 2000H Air Sampler, con flujo de 0.0167 m³/min o 16.7 l/min, durante un periodo aproximado de dos meses, midiéndose por 24 horas y utilizando filtros de fibra de cuarzo de 47 mm de diámetro. Se ejecutó en cinco puntos estratégicos dentro del campus de la UNALM (ver tabla 2 y figura 3), de manera inter-diaria (ver figura 4) durante dos semanas consecutivas por punto de tal forma que se llegasen a cubrir todos los días de la semana, llegándose a coleccionar 35 muestras de PM_{2.5} en filtros de fibra de cuarzo.

Cabe resaltar que durante el monitoreo se siguieron todas las pautas necesarias para evitar errores en los resultados. Ello consistió en: manipulación de los filtros estrictamente con pinzas, traslado de los filtros solamente dentro de sus respectivas placas Petri y sometimiento de los filtros a un proceso de secado utilizando un desecador por un periodo de 24 horas antes y después de la colección de muestra (a fin de evitar que la humedad contenida en el filtro interfiera en el resultado final).

Para la determinación de la concentración de PM_{2.5} se halló el peso inicial del filtro (antes del muestreo) y el peso final (después del muestreo), luego tales valores se ingresaron a la ecuación 1, obteniendo así, previa conversión de unidades, la concentración de PM_{2.5} por muestra en ug/m³. Promediando los valores de cada día muestreado por punto se calculó la concentración promedio (media aritmética) de PM_{2.5} en cada punto de monitoreo; y promediando dichos valores se obtuvo la concentración promedio de PM_{2.5} en el aire ambiental del campus de la UNALM.

Ecuación 1

$$PM_{2.5} = \frac{P_f - P_i}{V} \times 10^{-6}$$

Donde:

- $PM_{2.5}$: Concentración en $\mu\text{g}/\text{m}^3$
- P_f : Peso final del filtro (gr.)
- P_i : Peso inicial del filtro (gr.)
- V : Volumen (m^3)

Tabla 2. Puntos de Monitoreo

Punto	Lugar	Altura (m)	Descripción
Punto 1	Azotea del Laboratorio de Ingeniería Ambiental	6.15	Zona cercana a la Av. La Molina
Punto 2	Azotea de los Centros Federados	5.05	Zona de alto tránsito de estudiantes universitarios y cercana al comedor universitario
Punto 3	Azotea del Auditorio A-4	5.90	Zona de alto tránsito de estudiantes universitarios y cercana a salones de clase
Punto 4	Azotea de Servicios Generales	3.10	Zona cercana a Av. Raúl Ferrero y al estacionamiento de buses universitarios
Punto 5	Azotea de la Estación Meteorológica Alexander Von Humboldt	3.80	Zona rodeada de campos agrícolas

Fuente: Propia.



Figura 3. Puntos de Monitoreo

Fuente: Propia, utilizando el software Google Earth y el software versión de prueba ArcGIS.



Figura 4. Cronograma de Monitoreo de PM_{2.5}

Fuente: Propia.

3.4. Análisis de la concentración de los componentes químicos en el PM_{2.5}

Es importante mencionar que, a fin de evitar interferencias y/o errores en la determinación de la concentración de los componentes químicos del PM_{2.5}, todos los filtros post-monitoreo fueron colocados en placas Petri rotuladas con plumón y posteriormente hermetizadas con cinta adhesiva, siendo finalmente almacenadas a 4 °C en un táper de plástico dentro de una refrigeradora, hasta su correspondiente análisis. La rotulación de cada placa Petri se realizó de acuerdo al siguiente patrón:

$$P_{m.0n}$$

Donde:

- m: número correspondiente al punto de monitoreo, dentro del rango 1 a 5
- n: número correspondiente al día de monitoreo, dentro del rango 1 a 7

Por ejemplo, P1.05 corresponde al punto de monitoreo 1 (azotea del laboratorio de ingeniería ambiental) el día 5 (viernes).

3.4.1. Concentración de metales en el PM_{2.5}

La determinación de la concentración de metales en el PM_{2.5} se realizó en cinco filtros (1 filtro por punto) seleccionados siguiendo el criterio deducido del estudio

del Grupo de Ingeniería Química (2006) realizado en España, en donde la masa del material particulado y los metales contenidos en él presentan mayor concentración en los mismos días (ocurriendo esto entre Lunes y Viernes). Es decir, los filtros que presentaron mayor concentración en cada punto de monitoreo fueron utilizados para determinar la concentración de metales en el PM_{2.5}.

Tal determinación fue realizada a través de un laboratorio acreditado por el INACAL (Instituto Nacional de Calidad) utilizando Espectrometría de emisión atómica de plasma acoplado inductivamente (ICP-AES por sus siglas en inglés). El laboratorio dio como resultado las concentraciones de 31 metales: plata (Ag), aluminio (Al), arsénico (As), boro (B), bario (Ba), berilio (Be), calcio (Ca), cadmio (Cd), cerio (Ce), cobalto (Co), cromo (Cr), cobre (Cu), hierro (Fe), potasio (K), litio (Li), magnesio (Mg), manganeso (Mn), molibdeno (Mo), sodio (Na), níquel (Ni), fósforo (P), plomo (Pb), antimonio (Sb), selenio (Se), silicio (Si), estaño (Sn), estroncio (Sr), titanio (Ti), talio (Ta), vanadio (V) y zinc (Zn) en unidades de ug/filtro; tales unidades fueron convertidas a ug/m³ utilizando el volumen de aire muestreado estandarizado proporcionado por el Partisol durante el monitoreo (los metaloides B, As, Sb y Si, son tratados como metales en la presente investigación). Cabe resaltar que dentro del análisis por ICP-AES se incluyó la determinación del contenido metálico en un filtro blanco a fin de reducir el nivel de error. Así, toda concentración con la que se trabajó fue previamente ajustada de acuerdo al contenido metálico detectado en el filtro blanco, como se observa en la ecuación 2.

Ecuación 2

$$M_n = \frac{m_n - m_{nB}}{V}$$

Donde:

- M_n : Concentración del metal “n” en el filtro analizado (ug/m³), “n” varía de acuerdo a los 31 metales.
- m_n : Concentración de metal “n” en filtro (ug)
- m_{nB} : Concentración de metal “n” en filtro blanco (ug)
- V : Volumen (m³)

Con los valores de metal por punto de monitoreo obtenidos de la ecuación 2 se halló la concentración promedio de cada metal, el contenido total metálico por punto de monitoreo (suma de todos los metales) y sacando un promedio (media aritmética) de dichos valores totales se obtuvo la concentración total promedio de metales en el PM_{2.5}.

A fin de identificar a los metales predominantes en el PM_{2.5} era necesario jerarquizarlos de acuerdo al valor de su concentración promedio y, considerando que en algunos puntos de monitoreo se presentaron valores de concentración de metales por debajo del límite de detección del equipo, el cálculo de la media aritmética no se consideró representativo para tal fin; por ello, se optó por el cálculo de la mediana. El valor de la mediana indica que el 50% de los datos se encuentra por encima de su valor y que el otro 50% se encuentra por debajo de su valor.

Los datos obtenidos fueron organizados en tablas y gráficos de barras a fin de identificar los metales predominantes en el PM_{2.5} y su concentración por punto de monitoreo. Además, los metales fueron organizados en tres grupos: aquéllos que fueron detectados en al menos cuatro puntos de monitoreo (Grupo A), aquéllos detectados en uno, dos o tres puntos de monitoreo (Grupo B) y aquéllos que no fueron detectados en ningún punto de monitoreo (Grupo C). Se debe tener en cuenta que durante la discusión de resultados se optó por utilizar la información obtenida solamente de los metales del Grupo A; pues aquellos del Grupo B, al no haber tenido una detección constante, requieren de más estudios para comprobar si su presencia se debe a la zona de muestreo y/o a orígenes externos, o se debe a interferencias y/o contaminación durante su análisis de detección.

Utilizando la concentración de PM_{2.5} y la concentración de metales del mismo, se calculó el coeficiente de correlación de Spearman, a través del *software versión de prueba* Minitab, a fin de determinar si existe relación lineal entre ambas variables (considerando que la concentración de PM_{2.5} fue el criterio para seleccionar qué filtro analizar por ICP-AES). El coeficiente de correlación de Spearman sirvió para

cuantificar la posible relación entre ambas variables; sin embargo, cabe resaltar que fue utilizado debido a que las variables a analizar no se distribuyen normalmente e imposibilitan la aplicación de pruebas paramétricas.

El coeficiente de correlación de Spearman, representado con “r”, indica la fuerza de la relación entre ambas variables (mas no explica causalidad), teniendo diferentes intensidades (Vila et al., s.f.), de acuerdo a la tabla 3.

Tabla 3. Intensidad de relación de acuerdo al valor del coeficiente “r”

Valor de “r”	Intensidad de relación
1	Positiva perfecta
<0.5, 1>	Positiva fuerte
0.5	Positiva moderada
<0, 0.5>	Positiva débil
0	No hay relación
<-0.5, 0>	Inversa débil
-0.5	Inversa moderada
<-1, -0.5>	Inversa fuerte
-1	Inversa perfecta

Fuente: Vila et al., s.f.

Es importante resaltar que, al contar con una muestra muy pequeña, la representatividad de las pruebas estadísticas aplicadas debe ser tomada teniendo en cuenta dicha limitación. Ello se representa numéricamente a través del nivel de significación o valor α , en donde valores “p” menores o mayores que el valor α indican si existe asociación o no (respectivamente) entre las variables, a un nivel de probabilidad determinado (por ejemplo, un α de 0.05 representa una confiabilidad de 95%).

Por otro lado, se analizó la concentración total de metales en el PM_{2.5} y cada metal independientemente, considerando su distribución espacial y los valores de referencia internacionales de la tabla 1. Además se analizó probables relaciones entre metales a través de identificación de similitud en su distribución gráfica.

3.4.2. Concentración de aniones en el PM_{2.5}

La determinación de aniones solubles en agua (de ahora en adelante aniones) en el PM_{2.5} se realizó en diez filtros (2 filtros por punto). En este caso, considerando la bibliografía consultada en cuanto a la influencia de la radiación solar sobre el contenido de nitrato y sulfato en el PM_{2.5}, se utilizó dicha variable meteorológica como criterio de selección. Así, se seleccionaron 2 filtros por punto: uno de ellos correspondiente al día de monitoreo con menor radiación solar y otro correspondiente al día de monitoreo con mayor radiación solar.

Tal determinación fue realizada en el Laboratorio del Centro de Investigación en Química, Toxicología y Biotecnología Ambiental de la UNALM, en donde el autor de la presente investigación conjuntamente con un técnico de laboratorio realizaron el análisis. Para ello, los filtros fueron retirados de las placas Petri y colocados en envases de plástico (de aproximadamente 5 cm. de diámetro y 7 cm. de alto), en donde se agregó 10 ml de agua ultra pura y se hermetizó. Posteriormente, los 10 envases de plástico conteniendo los filtros fueron sometidos a baño de ultrasonidos (proceso por el cual se genera vibraciones en el material objetivo a través de ondas de ultrasonido que liberan las partículas deseadas) por 15 minutos y 40 °C, según la metodología aplicada por Baltensperger y Hertz (1985), en lo que constituye el proceso de extracción (proceso por el cual los aniones contenidos en el material particulado muestreado pasan a solución acuosa). Finalizada la extracción, la solución contenida en cada envase fue sometida a un proceso de filtración al vacío utilizando una bomba de extracción al vacío, filtros de membrana de 45 µm y tubos de ensayo (colectores del filtrado). De tal filtrado se extrajo 5 ml que fueron analizados, sin dilución, por un Cromatógrafo Iónico a fin de detectar la concentración de aniones como cloruro, sulfato, nitrato, fluoruro y bromuro.

El Cromatógrafo Iónico dio resultados de concentración de aniones en unidades ppm (partes por millón), dichas unidades fueron convertidas a $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Cabe resaltar que dentro del análisis por cromatografía iónica se incluyó la determinación del contenido de aniones en un filtro blanco a fin de reducir el nivel de error. Así, toda concentración con la que se trabajó fue previamente ajustada de acuerdo al contenido de aniones detectado en el filtro blanco, conforme a la ecuación 3.

Ecuación 3

$$A_n = \frac{(a_n - a_{nB}) \times f}{V}$$

Donde:

- A_n : Concentración del anión “n” en el filtro analizado ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), “n” varía de acuerdo a los aniones en estudio.
- a_n : Concentración del anión “n” en filtro (ppm)
- a_{nB} : Concentración de anión “n” en filtro blanco (ppm)
- f : Factor de conversión a μg , correspondiente a 10 mL
- V : Volumen (m^3)

Considerando que fueron dos filtros por anión se sacó un valor medio entre ambos para obtener el valor de anión por punto de monitoreo. En base a tales valores obtenidos se halló la concentración total promedio de cada anión (media aritmética de los puntos de monitoreo), la concentración total de aniones por punto de monitoreo (sumatoria) y la concentración total promedio de aniones (media aritmética de las sumatorias).

Se analizó la concentración total de aniones en el $\text{PM}_{2.5}$ y cada anión independientemente, considerando su distribución espacial. Además, considerando que según SEMARNAT (2011), una las formas predominantes del nitrato como aerosol es el nitrato de sodio; y al contar con datos correspondientes a sodio y nitrato se optó por hallar el coeficiente de correlación de Spearman entre ambas variables para analizar su relación, utilizando el *software versión de prueba* Minitab

y verificando el valor “r” y “p” para asegurar la existencia de relación entre ambos grupos de datos.

3.4.3. Análisis integral de la composición química del PM_{2.5}

Liu et al. (2015) determinaron la concentración de PM_{2.5} y su composición química en tres zonas diferentes en la ciudad de Taian – China, durante los periodos de agosto-setiembre y noviembre, sufriendo este último un alza en la concentración de PM_{2.5} por un evento de contaminación. Así, se determinaron las concentraciones de diversos elementos en tres zonas distintas: AU (zona industrial y de alto tráfico vehicular), EPS (zona comercial y de tráfico vehicular) y PS (zona residencial y de tráfico vehicular). Con fines de comparación se utilizaron los datos recolectados por Liu et al. (2015) en la zona residencial PS para compararlos con los resultados obtenidos en la presente investigación, organizando todo ello en una tabla.

Por otro lado, teniendo los valores del contenido promedio total de metales y de aniones en el PM_{2.5} de la zona se calculó qué porcentaje del total constituían y además, siguiendo la ecuación 4, se calculó cuánta masa del PM_{2.5} del aire ambiental del campus de la UNALM correspondía a otros componentes químicos diferentes a los metales y aniones analizados.

Ecuación 4

$$PM_{2.5} = M + A + B$$

Donde:

- PM_{2.5} : Concentración promedio de PM_{2.5} del aire ambiental del campus UNALM (ug/m³)
- M : Concentración total del contenido metálico del PM_{2.5} del aire ambiental del campus UNALM (ug/m³)
- A : Concentración total de los aniones del PM_{2.5} del aire ambiental del campus UNALM (ug/m³).
- B : Concentración otros componentes químicos del PM_{2.5} del aire ambiental del campus UNALM (ug/m³).

3.5. Análisis de la influencia de variables meteorológicas sobre la composición química del PM_{2.5}

3.5.1. Análisis de la influencia de la radiación solar sobre la composición química del PM_{2.5}

Para la presente investigación se consideró a la influencia de la radiación solar solamente sobre el contenido de aniones del PM_{2.5}. A través de gráficas de barras y de la determinación del coeficiente de correlación de Spearman (utilizando el *software versión de prueba Minitab*) se buscó establecer relación entre el contenido de cada anión en el PM_{2.5} y la radiación solar reportada los días correspondientes.

3.5.2. Análisis de la influencia del viento sobre la composición química del PM_{2.5}

Para poder proceder con este análisis se elaboró primeramente la rosa de viento correspondiente a todo el periodo de monitoreo, es decir desde el 4 de Julio al 10 de Setiembre. Para ello se utilizó el *software WR Plot*, ingresando datos de precipitación (mm), velocidad del viento (m/s) y dirección del viento (°), todos ellos obtenidos de la Estación Meteorológica Alexander Von Humboldt.

Teniendo la rosa de viento elaborada, se le contrastó espacialmente con la información correspondiente a las concentraciones de los componentes químicos del PM_{2.5}, a fin de determinar la influencia de la dirección del viento de la zona sobre los mismos.

3.5.3. Análisis de la influencia de otras variables meteorológicas sobre la composición química del PM_{2.5}

Trabajando con datos de precipitación, temperatura y humedad relativa, se elaboraron gráficas de líneas que mostraron el comportamiento de las variables meteorológicas mencionadas durante el periodo de monitoreo. Comprobándose la leve variación de las variables meteorológicas mencionadas durante los días de

monitoreo, no se ejecutó análisis alguno mas que con aquéllos días que presentaban valores extremos.

3.6. Identificación de posibles orígenes de contaminación que influyan en la composición química del PM_{2.5}

Contrastando los datos de concentración de los componentes químicos del PM_{2.5} y de dirección del viento con la distribución espacial de los contaminantes, se realizó un análisis que permitió estimar los posibles orígenes de tales componentes. Además, se requirió de información técnica, ubicación de avenidas y calles cercanas, recorrido por la zona para identificación de posibles orígenes de contaminación e imágenes a diferentes escalas de vista superior de la zona. También, donde fuese pertinente se calculó el coeficiente de correlación de Spearman, utilizando el *software versión de prueba* Minitab, para establecer la relación entre determinadas variables.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Determinación de la concentración de PM_{2.5}

A partir de los resultados obtenidos del monitoreo realizado durante los meses de Julio, Agosto e inicios de Setiembre, se determinó que el valor promedio de PM_{2.5} en el aire ambiental del campus de la UNALM es de 50.33 ug/m³, valor superior al ECA nacional establecido para PM_{2.5} (25 ug/m³). Igualmente se calculó el valor promedio de PM_{2.5} por cada punto de monitoreo, determinándose que el punto P4 correspondiente a la azotea de servicios generales (zona cercana a la Av. Raúl Ferrero y al estacionamiento de buses universitarios) presentó la mayor concentración con un valor de 53.73 ug/m³, mientras que el punto P5 correspondiente a la azotea de la Estación Meteorológica Alexander Von Humboldt (zona rodeada de campos agrícolas) presentó la menor concentración promedio con un valor de 46.21 ug/m³; sin embargo, en todos los puntos de monitoreo se superó al valor del ECA establecido. Todo ello se aprecia gráficamente en las figura 5.

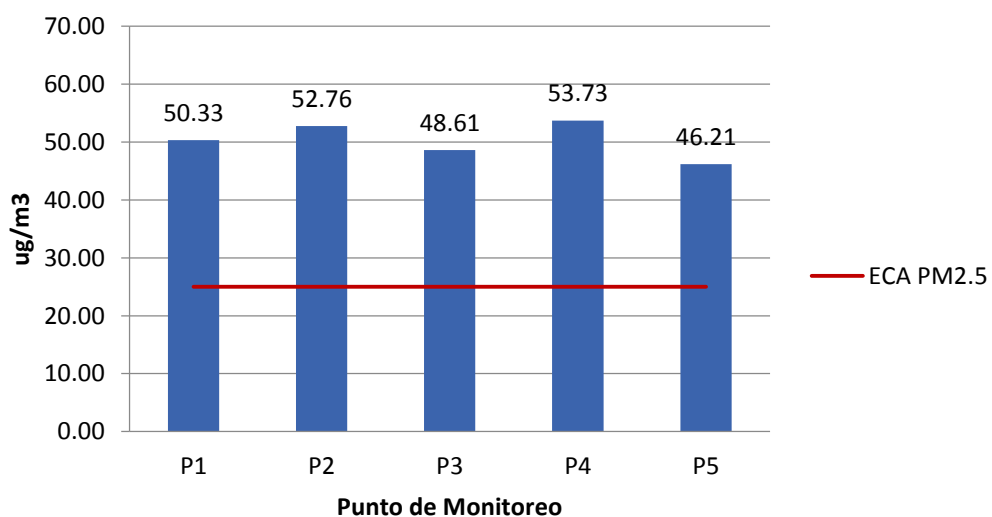


Figura 5. Concentración promedio de PM_{2.5} por punto de monitoreo

Fuente: Propia.

4.2. Análisis de la concentración de los componentes químicos en el PM_{2.5}

4.2.1. Concentración de metales en el PM_{2.5}

Habiendo determinado las concentraciones de PM_{2.5} se seleccionó los filtros con mayor concentración de material particulado por punto de monitoreo, conforme a la tabla 4.

Tabla 4. Filtros seleccionados conforme a concentración de PM_{2.5}

Punto	Filtro	PM_{2.5} (ug/m³)	Fecha de muestreo	Día de muestreo
P1	P1.03	66.44	08/07/2016	Viernes
P2	P2.07	70.71	30/07/2016	Sábado
P3	P3.06	53.90	11/08/2016	Jueves
P4	P4.04	79.16	21/08/2016	Domingo
P5	P5.03	62.29	02/09/2016	Viernes

Fuente: Propia.

Luego de haber analizado los cinco filtros se determinó la concentración de 31 metales en el PM_{2.5} y en base a dichos datos se les clasificó en los Grupos A, B y C (ver ítem 5.4.1). Dentro del Grupo C se clasificó a los metales Ag, B, Be, Cd, Co, Sb, Se y Tl. Los metales clasificados en los Grupos A y B se muestran en la tabla 5 ordenados a manera descendente en base a la mediana de sus concentraciones, observándose que los metales predominantes en el PM_{2.5} del aire ambiental del campus de la UNALM son Na, Si, Ca, K, P y Fe.

Tabla 5. Concentración de metales en el PM_{2.5}

Metales		Concentración (ug/m ³)					Mediana (ug/m ³)
		P1	P2	P3	P4	P5	
Grupo A							
Sodio	Na	2.342	2.042	1.580	1.567	0.955	1.580
Silicio	Si	0.922	0.578	0.489	0.396	0.677	0.578
Calcio	Ca	0.748	0.886	0.502	0.017	0.004	0.502
Potasio	K	0.319	0.483	0.407	0.250	0.218	0.319
Fósforo	P	0.303	0.196	0.299	0.225	0.091	0.225
Hierro	Fe	0.088	0.144	0.191	0.083	0.513	0.144
Magnesio	Mg	0.091	0.158	0.101	0.096	0.219	0.101
Aluminio	Al	0.096	0.155	0.074	N.D.	0.294	0.096
Zinc	Zn	0.070	0.019	0.175	0.024	0.071	0.070
Plomo	Pb	0.015	0.014	0.012	0.014	N.D.	0.014
Manganeso	Mn	0.009	0.007	0.016	N.D.	0.016	0.009
Cobre	Cu	0.014	0.010	0.011	0.006	0.015	0.011
Titanio	Ti	0.002	0.005	0.005	0.004	0.017	0.005
Cromo	Cr	0.005	0.005	0.006	0.003	N.D.	0.005
Bario	Ba	0.008	0.002	0.004	0.004	0.009	0.004
Níquel	Ni	0.004	0.003	0.006	0.010	N.D.	0.004
Vanadio	V	0.002	0.002	0.004	0.014	0.002	0.002
Molibdeno	Mo	0.002	N.D.	0.003	0.002	0.004	0.002
Estroncio	Sr	0.003	0.003	0.002	N.D.	0.001	0.002
Grupo B							
Arsénico	As	0.036	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	---
Estaño	Sn	0.007	N.D.	N.D.	N.D.	0.012	---
Cerio	Ce	0.017	N.D.	0.003	0.001	N.D.	---
Litio	Li	N.D.	N.D.	0.001	N.D.	N.D.	---

Fuente: Propia.

Con el contenido total metálico (considerando solo al Grupo A) por punto de monitoreo se elaboró la figura 6, mostrando que el punto P1 presentó la mayor concentración total de metales (5.04 ug/m³) pese a que no fue el que presentó la mayor concentración de PM_{2.5}, seguido del punto P2 (4.71 ug/m³), del P3 (3.89 ug/m³), del P5 (3.11 ug/m³) y finalmente del P4 (2.72 ug/m³). El valor promedio del contenido metálico del PM_{2.5} corresponde a 3.89 ug/m³, 7.7% del contenido promedio de PM_{2.5}.

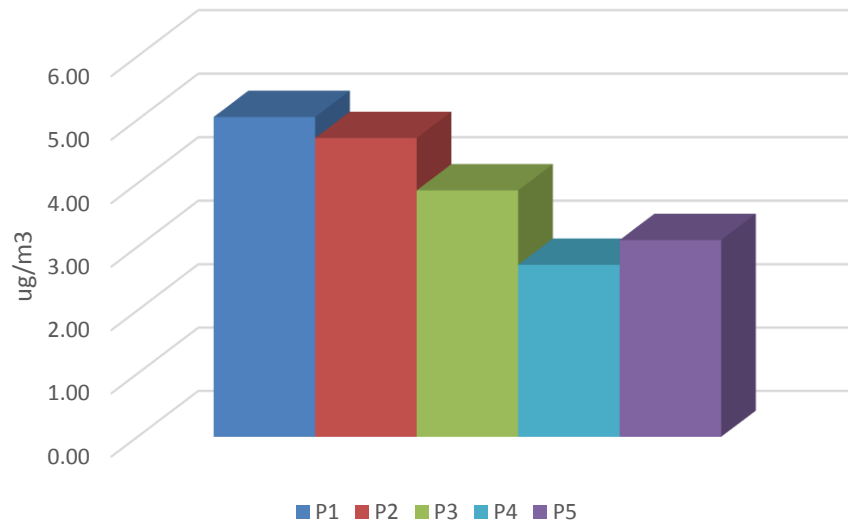


Figura 6. Contenido total metálico del PM_{2.5} por punto de monitoreo
Fuente: Propia.

Por otra parte en las figuras 7 a 11 se puede apreciar la concentración de metales por cada punto de monitoreo. En ellas se observa que para todos los puntos de monitoreo predomina el sodio, situación que se repite en la investigación realizada por Jiang et al. (2015), en donde el sodio predominó en cuatro zonas de monitoreo en la ciudad de Hong Kong – China. Por otra parte, la investigación realizada por Liu et al. (2015) reportó la predominancia del silicio en tres zonas de monitoreo en la ciudad de Taian – China; tal metal es el segundo predominante a nivel general de acuerdo a la tabla 5. Todo ello sugiere que el sodio y el silicio son, probablemente, los elementos traza predominantes en el material particulado fino de una zona urbana.

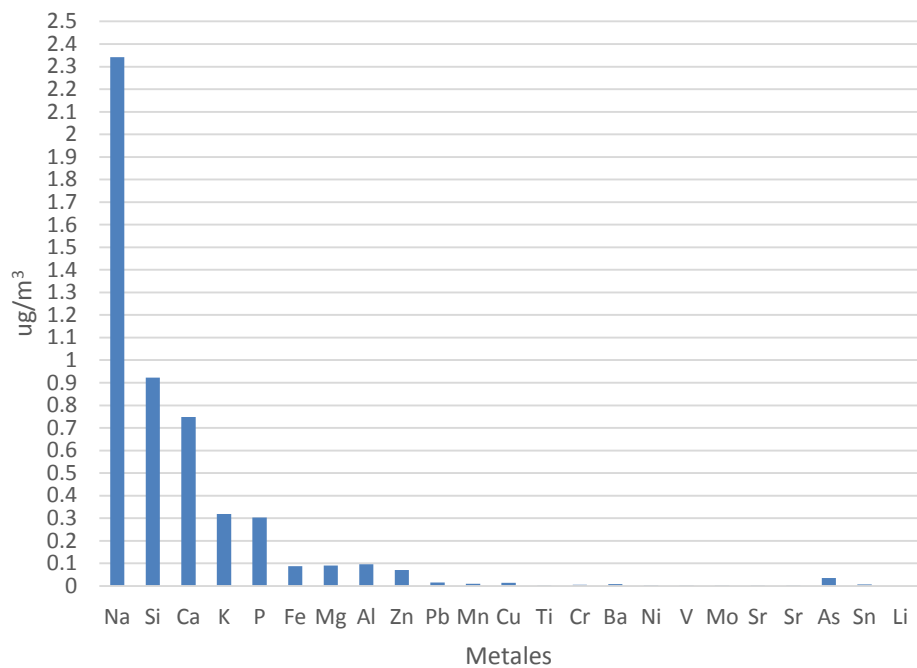


Figura 7. Concentración de metales en P1
Fuente: Propia.

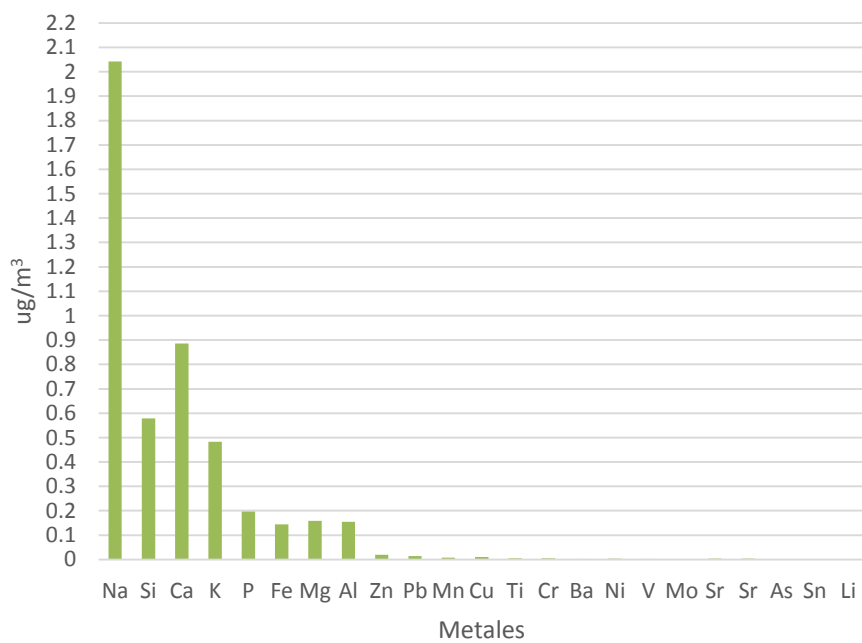


Figura 8. Concentración de metales en P2
Fuente: Propia.

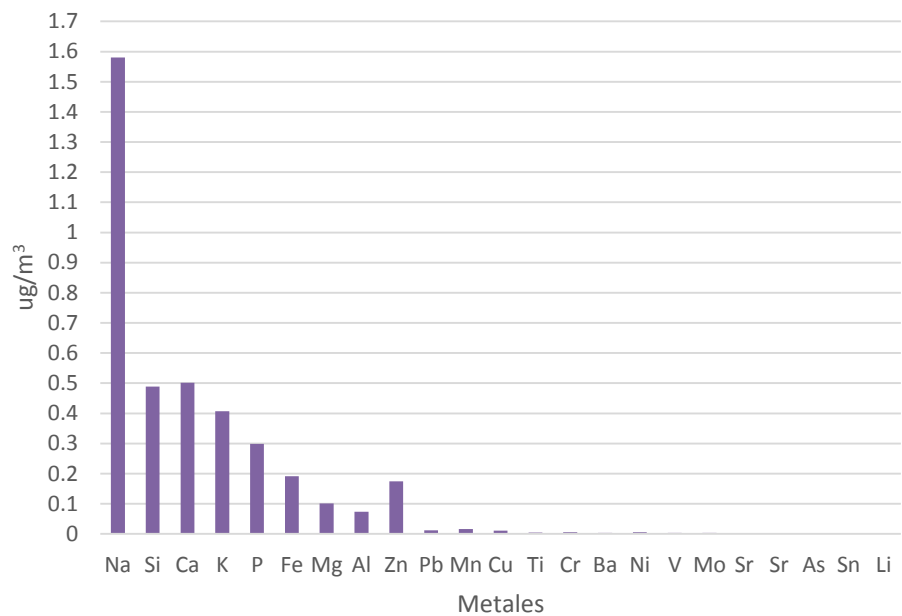


Figura 9. Concentración de metales en P3

Fuente: Propia.

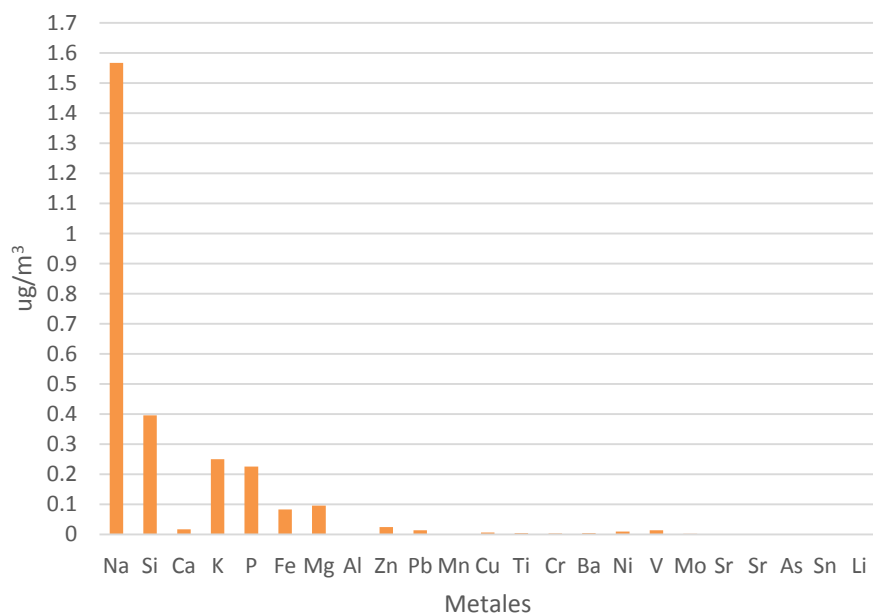


Figura 10. Concentración de metales en P4

Fuente: Propia.

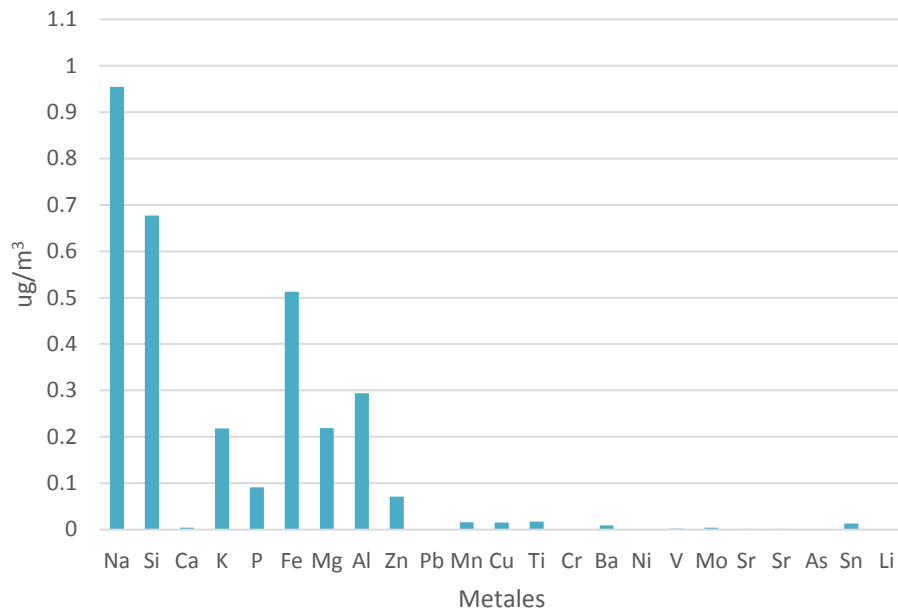


Figura 11. Concentración de metales en P5

Fuente: Propia.

Se comprobó la existencia de relación entre la concentración total de metales por punto de monitoreo y la concentración promedio de $PM_{2.5}$ por punto de monitoreo a través del coeficiente de correlación de Spearman. El resultado de ello fue la obtención de un coeficiente de -0.2 , es decir una relación inversa débil (ver tabla 3), contrario a la relación positiva deducible del estudio de Grupo de Ingeniería Química (2006), pero con un valor “p” de 0.747 que indica que la confiabilidad para aceptar tal resultado es muy baja y se requiere de mayor cantidad de datos para asegurar la confiabilidad. Todo ello indicaría que la concentración promedio de $PM_{2.5}$ no fue un criterio adecuado para la selección de los filtros a ser analizados por ICP-AES. Sin embargo, ello también corrobora que la concentración de metales en el material particulado del aire está influenciada por otros factores (probablemente diversos).

Sin embargo, considerando que toda muestra tomada brinda información valiosa, los metales encontrados en el $PM_{2.5}$ del aire ambiental del campus de la UNALM servirán para dar un diagnóstico general de la zona y también como posibles niveles

de fondo para comparaciones con futuras investigaciones que analicen eventos extremos relacionados a la alteración de la composición química del material particulado de la zona en estudio. A continuación se expone la distribución espacial de cada metal clasificado dentro del Grupo A.

Sodio

Este metal es uno de los más predominantes en la corteza terrestre global y ello se comprueba al ver que es el metal predominante en el $PM_{2.5}$ del aire ambiental del campus de la UNALM (tabla 5). El punto P1 es el que presenta mayor concentración (2.342 ug/m^3), mientras que el punto P5 presenta la menor concentración (0.955 ug/m^3). Debido a que el sodio no es considerado como un metal tóxico, no cuenta con valores referencia respecto a su peligrosidad; ello no exime que su monitoreo deba ser ejecutado para descartar comportamientos extraños.

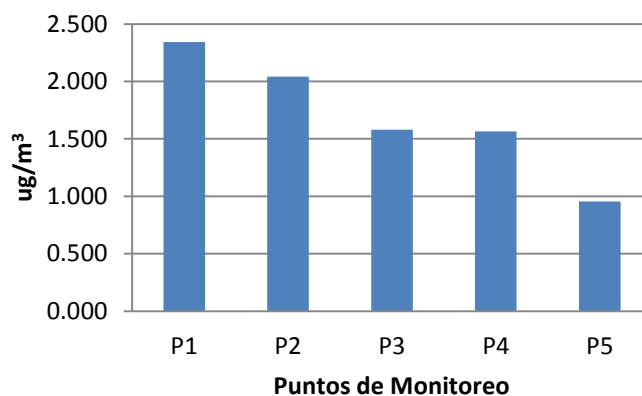


Figura 12. Concentración de sodio (Na) por punto de monitoreo

Fuente: Propia.

Silicio

El silicio, estrictamente un metaloide debido a sus características particulares, está presente en diferentes formas en la corteza terrestre lo que justifica su alta predominancia en la misma. Según los resultados obtenidos, es el segundo metal más predominante en el $PM_{2.5}$ del aire ambiental del campus de la UNALM; sin embargo, presenta un valor de mediana de concentración por debajo de la mitad de

la del sodio. El punto P1 es el que presenta mayor concentración (0.922 ug/m^3), mientras que el punto P4 presenta la menor concentración (0.396 ug/m^3). Debido a que el silicio no es considerado como un metal tóxico, no cuenta con valores referencia respecto a su peligrosidad; ello no exime que su monitoreo deba ser ejecutado para descartar comportamientos extraños.

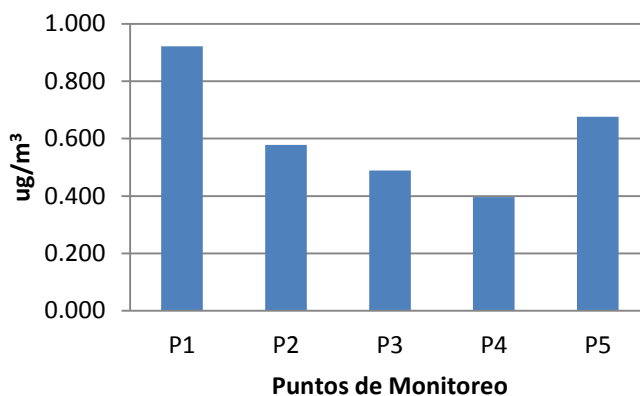


Figura 13. Concentración de silicio (Si) por punto de monitoreo

Fuente: Propia.

Calcio

En la figura 14 se observa que este metal se presentó mayoritariamente en los puntos P1, P2 y P3; alcanzando su máxima concentración en el punto P2 con un valor de 0.886 ug/m^3 . Debido a que el calcio no es considerado como un metal tóxico, no cuenta con valores referencia respecto a su peligrosidad; ello no exime que su monitoreo deba ser ejecutado para descartar comportamientos extraños.

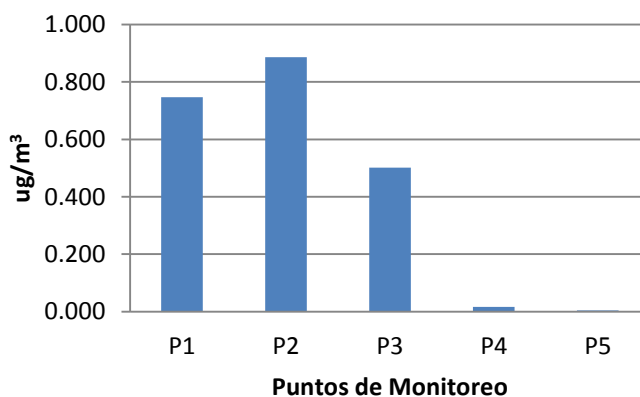


Figura 14. Concentración de calcio (Ca) por punto de monitoreo

Fuente: Propia.

Potasio

Este metal presentó su mayor concentración en el punto P2 (0.483 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) y sus menores concentraciones en los puntos P4 y P5 (0.250 y 0.218 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente). El potasio no cuenta con valores referencia respecto a su peligrosidad; ello no exime que su monitoreo deba ser ejecutado para descartar comportamientos extraños.

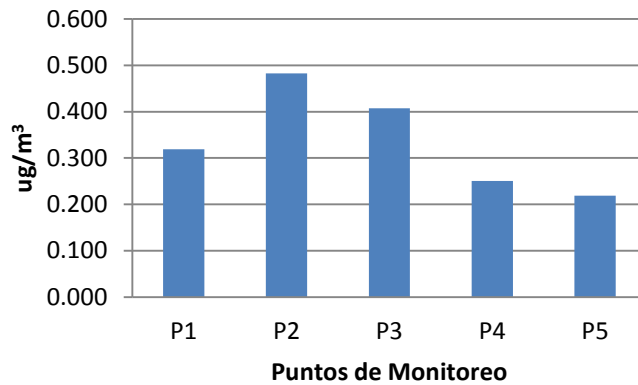


Figura 15. Concentración de potasio (K) por punto de monitoreo

Fuente: Propia.

Fósforo

El fósforo presentó concentraciones máximas entre 0.303 y 0.299 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en los puntos P1 y P3 respectivamente. La menor concentración que presentó fue en el punto P5, con un valor de 0.091 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. El fósforo tampoco cuenta con valores referencia respecto a su peligrosidad; ello no exime que su monitoreo deba ser ejecutado para descartar comportamientos extraños.

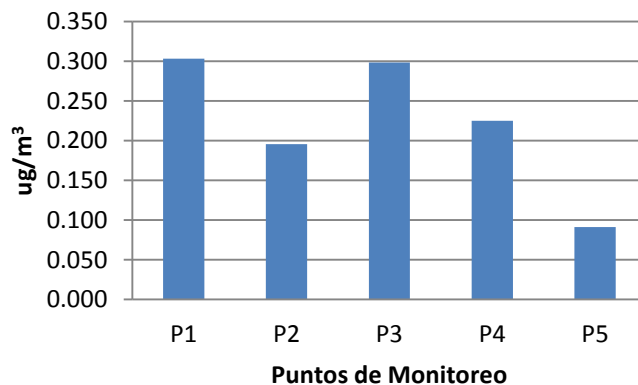


Figura 16. Concentración de fósforo (P) por punto de monitoreo

Fuente: Propia.

Hierro

Este metal presentó la mayor concentración en el punto P5 con un valor de 0.513 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (el cual es mucho mayor que los valores determinados en los otros puntos de monitoreo) y la menor concentración en el punto P4 (0.083 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Como se observa en la figura 17 los valores de hierro en el $\text{PM}_{2.5}$ del aire ambiental del campus de la UNALM están muy por debajo del valor típico urbano (VTU) para hierro (1.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), pero para el caso del punto P5 se llega a superar el valor típico rural (VTR) para hierro (0.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Considerando a La Molina como zona urbana, las concentraciones de hierro están dentro de los valores típicos por lo que no representarían un riesgo para la población de la zona; sin embargo, considerando que el punto P5 se aproxima a una zona rural (por la presencia de áreas verdes y campos agrícolas), el valor típico de comparación más adecuado sería el rural, el cual es superado sugiriendo presencia de influencias externas en la concentración de hierro en tal punto.

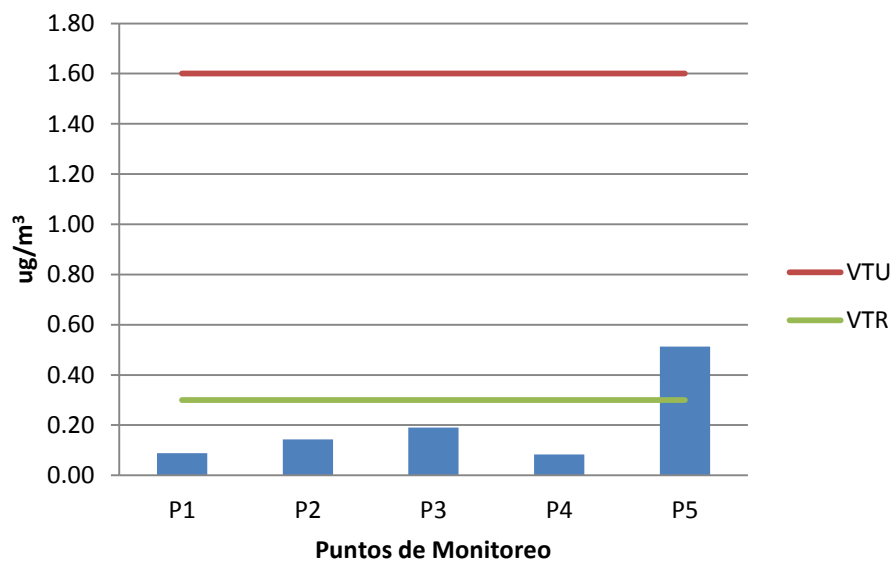


Figura 17. Concentración de hierro (Fe) por punto de monitoreo

Fuente: Propia.

Magnesio

En la figura 18 se observa que el magnesio se presentó con mayor concentración en el punto P5 (0.219 ug/m^3) y con menor concentración en el punto P1 (0.091 ug/m^3). Debido a que el potasio tampoco es considerado como un metal tóxico, no cuenta con valores referencia respecto a su peligrosidad; ello no exime que su monitoreo deba ser ejecutado para descartar comportamientos extraños.

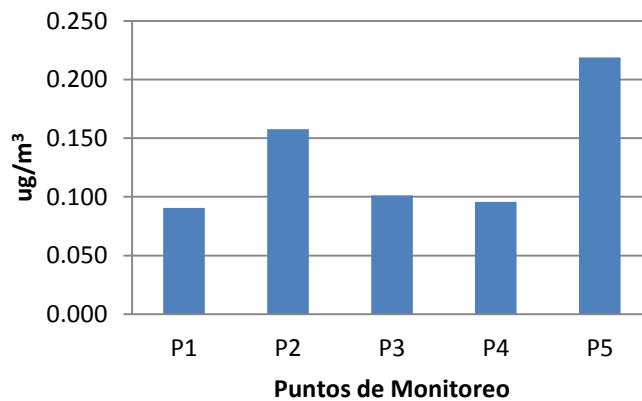


Figura 18. Concentración de magnesio (Mg) por punto de monitoreo

Fuente: Propia.

Aluminio

Se observa que la mayor concentración de aluminio se presenta en el punto P5 (0.294 ug/m^3) y la menor en el punto P3 (0.074 ug/m^3), mientras que en el punto P4 no se detectó presencia de dicho metal. El Aluminio no cuenta con valores referencia respecto a su peligrosidad; ello no exime que su monitoreo deba ser ejecutado para descartar comportamientos extraños.

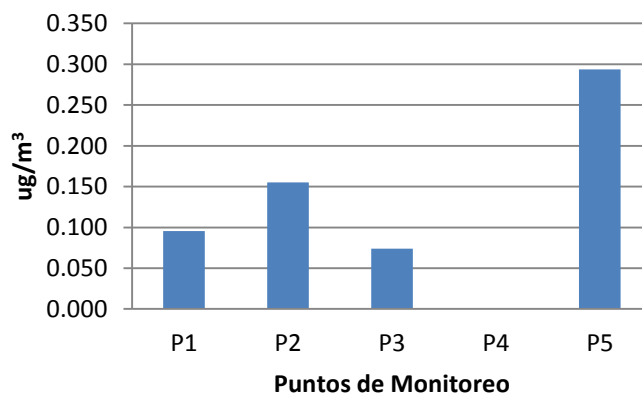


Figura 19. Concentración de aluminio (Al) por punto de monitoreo

Fuente: Propia.

Zinc

Para esta situación se presentó la mayor concentración de zinc en el punto P3 (azotea del auditorio A4) con un valor de 0.175 ug/m^3 (el cual es mucho mayor que los valores determinados en los otros puntos de monitoreo) y la menor concentración en el punto P2 (0.019 ug/m^3).

Como se observa en la figura 20 las concentraciones de zinc en el $\text{PM}_{2.5}$ del aire ambiental del campus de la UNALM están por debajo del valor típico urbano (VTU) para zinc (0.103 ug/m^3), a excepción del punto P3 en donde se supera ampliamente dicho valor representando una zona con posible riesgo potencial por exposición al zinc, considerando su relación con inducción de cáncer pulmonar (Jiang et al. 2015) y afectación del sistema inmunológico (Chen et al. 2014). Por su parte el valor típico rural (VTR) para zinc (0.006 ug/m^3) es superado en todos los puntos de monitoreo, indicando que el zinc es un metal de zona urbana y con considerable presencia en el aire ambiental del campus de la UNALM.

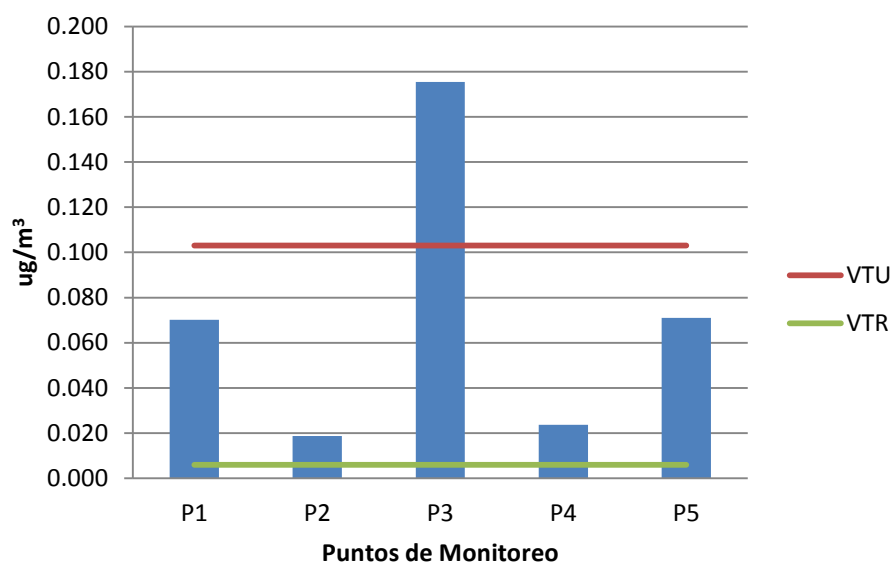


Figura 20. Concentración de zinc (Zn) por punto de monitoreo

Fuente: Propia.

Plomo

El plomo en la atmósfera ha sido ampliamente estudiado debido a sus efectos conocidos sobre la salud de las personas, especialmente en grupos vulnerables como los niños. Nacionalmente es el único metal que cuenta con ECA (mensual y anual), además de normativa que eliminó su presencia en gasolinas a nivel nacional (Decreto Supremo N° 019-98-MTC).

Por ende se esperaría que los niveles de plomo en el aire ambiental de Lima sean imperceptibles por equipos de detección, pero tal situación solo se cumple en el punto P5. Sin embargo, la concentración de plomo detectada en los demás puntos de monitoreo está por debajo tanto del valor típico urbano (VUT) y del valor típico rural (VTR) para plomo (0.04 y 0.02 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente), como del valor mínimo de riesgo de cáncer (uno en 1 millón) de 0.03 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Por ende, si bien el plomo no está totalmente ausente de la atmósfera de La Molina, no se le considera como un agente de riesgo potencial para la población de la zona.

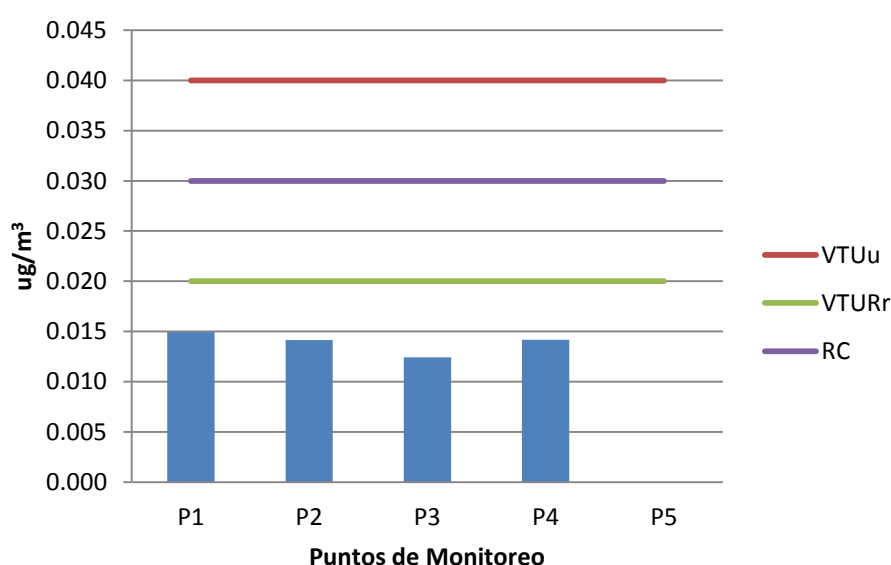


Figura 21. Concentración de plomo (Pb) por punto de monitoreo

Fuente: Propia.

Manganeso

Este metal presentó la máxima concentración en el punto P5 (0.016 ug/m³), mientras que la menor concentración fue detectada en el punto P2 (0.007 ug/m³) y en el punto P4 no fue detectado.

Como se observa en la figura 22 las concentraciones de manganeso en el PM_{2.5} del aire ambiental del campus de la UNALM están por debajo del valor típico urbano (VTU) para manganeso (0.02 ug/m³), pero superan ampliamente el valor típico rural (VTR) para manganeso (0.001 ug/m³). Este metal puede tornarse de preocupación pues según Chen et al. (2014) afecta al sistema inmunológico a través del sistema respiratorio.

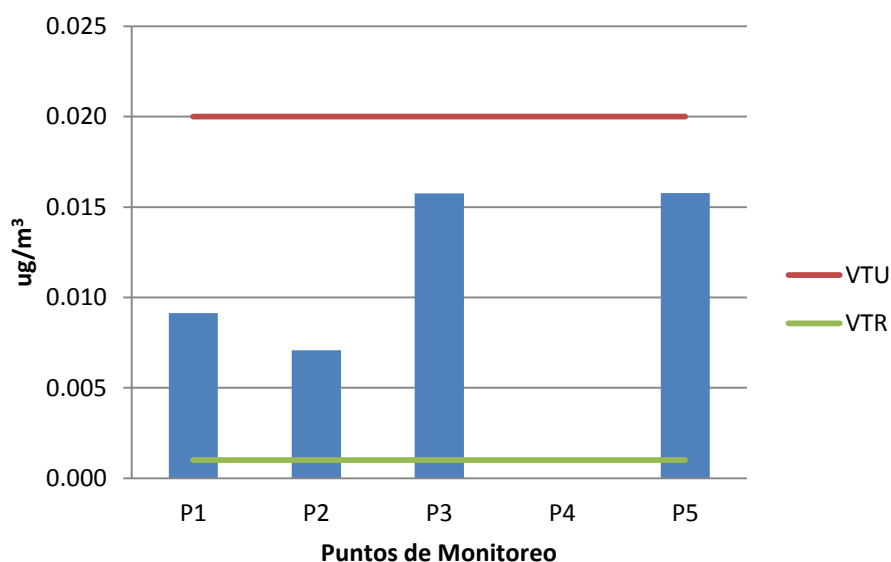


Figura 22. Concentración de manganeso (Mn) por punto de monitoreo

Fuente: Propia.

Cobre

Para el cobre, un metal conocido por su valor en el mercado minero, se esperaría que su presencia en una atmósfera urbana sea mínima; situación que sí se cumple en el caso de La Molina en donde el valor típico urbano (VTU) para cobre (0.29 ug/m³) no es ni siquiera cercano a las concentraciones detectadas, y el valor típico

rural (VTR) para cobre (0.01 ug/m^3) es apenas igualado, pues las concentraciones van de 0.006 ug/m^3 a 0.015 ug/m^3 (figura 23).

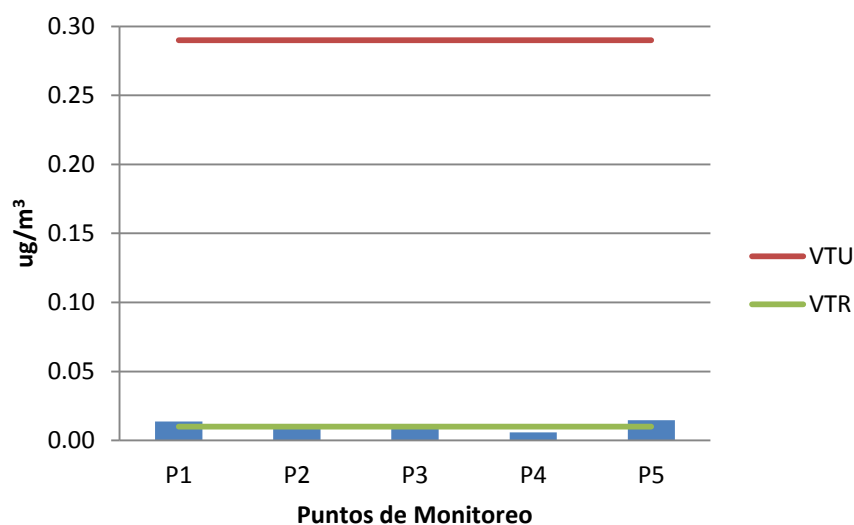


Figura 23. Concentración de cobre (Cu) por punto de monitoreo

Fuente: Propia.

Titanio

Para el caso del titanio se observa que la mayor concentración se presentó en el punto P5 (0.017 ug/m^3), la cual es superior a las demás concentraciones detectadas. La menor concentración se halló en el punto P1 (0.002 ug/m^3).

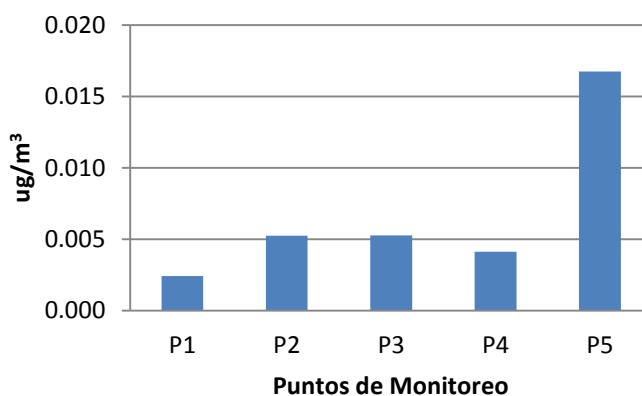


Figura 24. Concentración de titanio (Ti) por punto de monitoreo

Fuente: Propia.

Cromo

El cromo presentó la mayor concentración en el punto P3 con un valor de 0.006 ug/m³ y la menor concentración en el punto P5, donde no fue detectado. Como se observa en la figura 25 las concentraciones de cromo en el PM_{2.5} del aire ambiental del campus de la UNALM están por debajo del valor típico urbano (VTU) para cromo (0.02 ug/m³), mientras que el valor típico rural (VTR) para cromo (0.002 ug/m³) es superado en todos los puntos de monitoreo en donde se detectó a dicho metal.

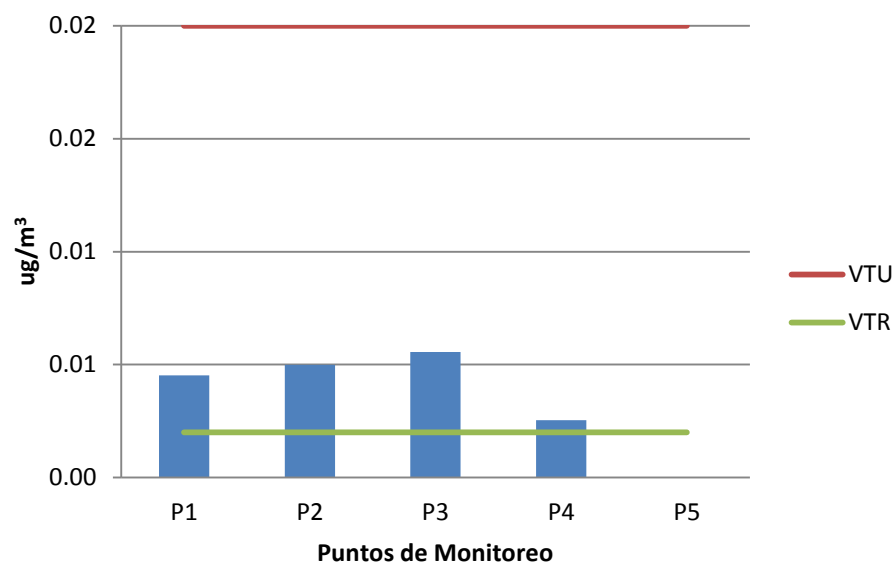


Figura 25. Concentración de cromo (Cr) por punto de monitoreo

Fuente: Propia.

Bario

Para el bario se observa en la figura 26 que la mayor concentración se presentó en el punto P5 (0.009 ug/m³) y la menor concentración en el punto P2 (0.002 ug/m³). No se cuenta con valores de referencia para este metal.

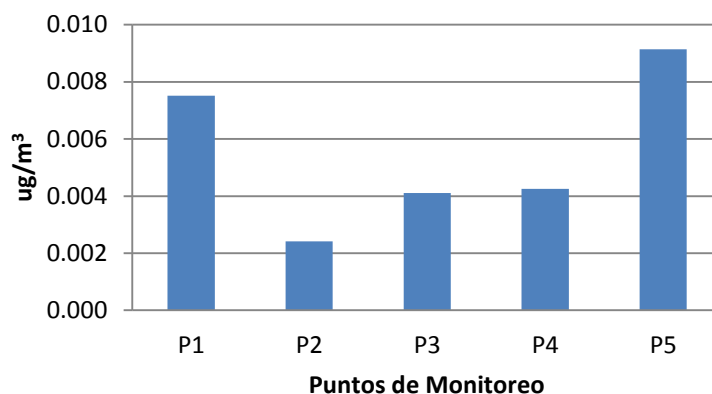


Figura 26. Concentración de bario (Ba) por punto de monitoreo

Fuente: Propia

Níquel

Este metal a ciertos niveles puede representar un problema para la salud de la población, por ello tiene establecido un valor típico urbano (VTU) de 0.02 ug/m^3 , el cual no es superado en ningún punto de monitoreo; un valor típico rural (VTR) de 0.006 ug/m^3 , el cual es superado en el punto P4 donde se presentó la mayor concentración de níquel (0.01 ug/m^3) e igualado en el punto P3; y además también cuenta con un valor mínimo de riesgo de cáncer (uno en 1 millón) de 0.01 ug/m^3 , el cual es igualado en el punto P4.

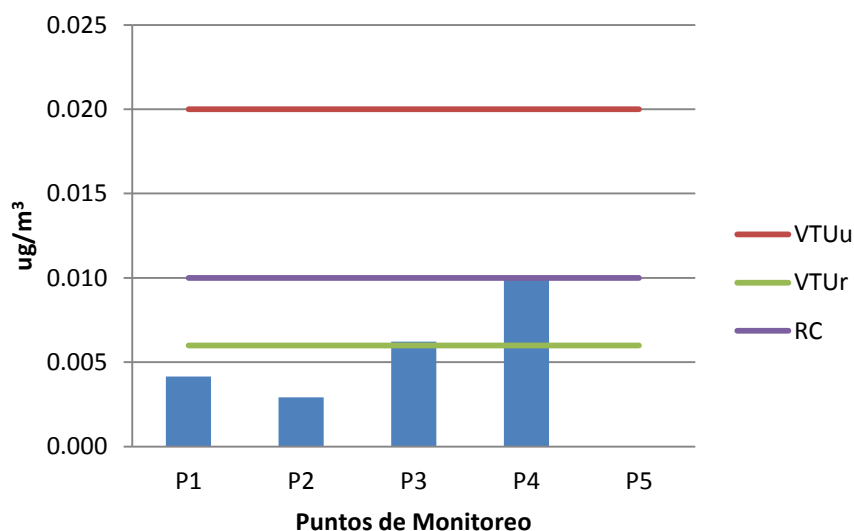


Figura 27. Concentración de níquel (Ni) por punto de monitoreo

Fuente: Propia.

Vanadio

El vanadio presentó concentraciones mínimas en la mayoría de los puntos de monitoreo, a excepción del punto P4 en donde presentó su concentración máxima (0.014 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) superando el valor típico rural (VTR) para vanadio (0.0008 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Los valores VTU (valor típico urbano) de 0.065 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y RC (riesgo mínimo de cáncer) de 0.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ no fueron superados, como se observa en la figura 28.

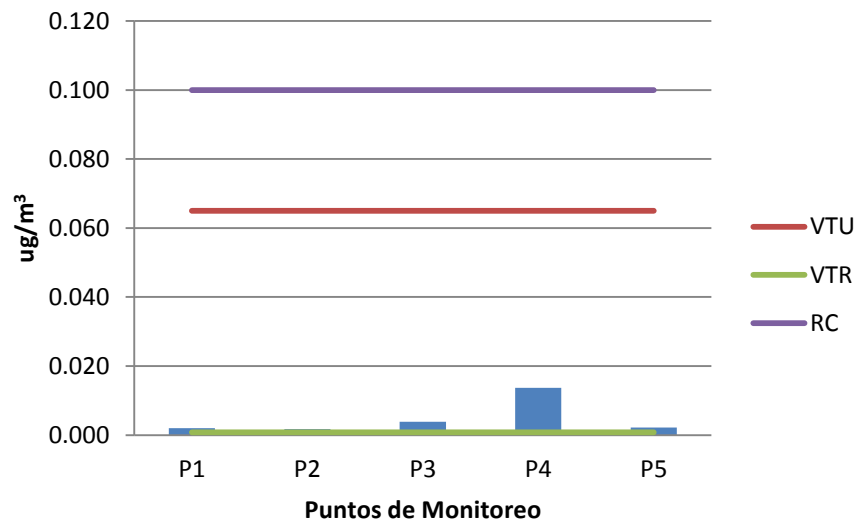


Figura 28. Concentración de vanadio (V) por punto de monitoreo

Fuente: Propia.

Molibdeno

Para el molibdeno se observa que la mayor concentración se presentó en el punto P5 (0.004 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) y la menor concentración en el punto P2 donde no fue detectado.

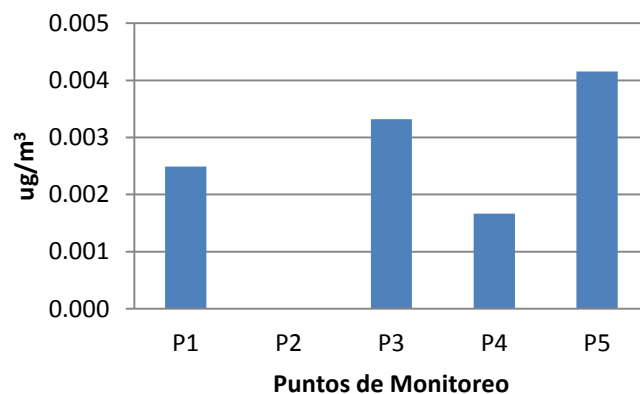


Figura 29. Concentración de molibdeno (Mo) por punto de monitoreo

Fuente: Propia.

Estroncio

Este metal presentó la mayor concentración en el punto P2 (0.0035 ug/m³) y la menor concentración en el punto P4 (0.002 ug/m³), donde no fue detectado, como se observa en la figura 30.

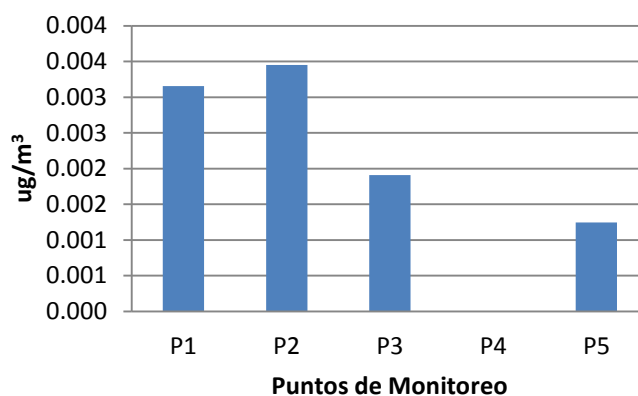


Figura 30. Concentración de estroncio (Sr) por punto de monitoreo

Fuente: Propia.

Entonces, a manera general se percibe que las concentraciones de los metales en el PM_{2.5} del aire ambiental del campus de la UNALM no son de carácter alarmante, pero sí ameritan atención pues el Zn superó su valor típico urbano (VTU) en uno de los puntos de monitoreo; el Fe, Zn, Mn, Cu, Cr, Ni y V superaron su valor típico rural (VTR) en al menos un punto de monitoreo; y el Ni igualó su valor de riesgo mínimo de cáncer (RC) en uno de los puntos de monitoreo.

Por otra parte, teniendo todos los resultados, se asoció a aquellos metales que presentaban una tendencia similar gráficamente, obteniéndose así dos tipos de gráficos. La figura 31 muestra líneas con forma de “W” (a diferentes intensidades) que presentan las concentraciones de los metales cobre (Cu), manganeso (Mn), molibdeno (Mo) y zinc (Zn).

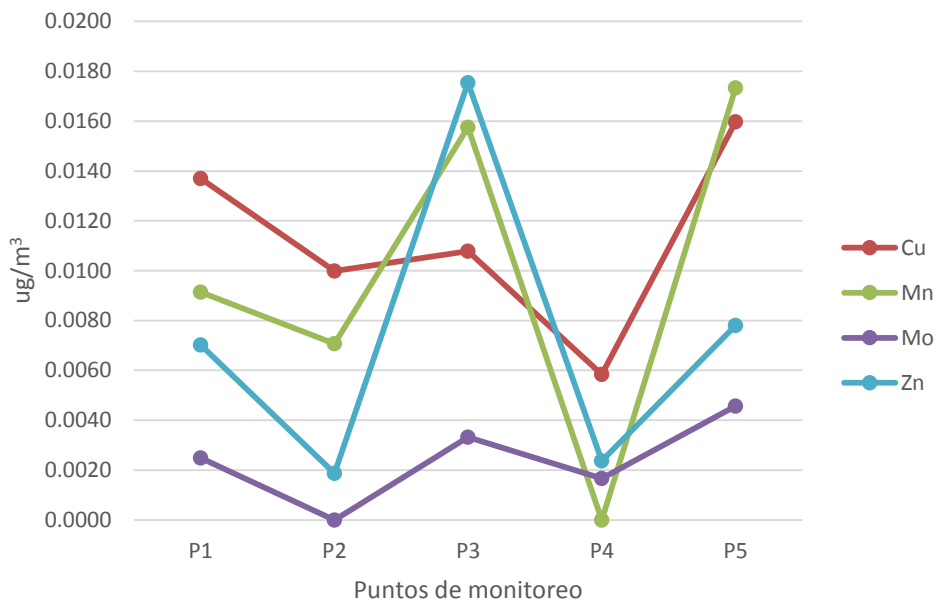


Figura 31. Líneas de concentración de metales con forma de “W”

Nota: las concentraciones de zinc están en unidades de 10^{-1} ug/m³, solamente para fines didácticos.

Fuente: Propia.

Por su parte, la figura 32 presenta gráficamente las concentraciones de níquel (Ni) y vanadio (V), las cuales tienen un pico en el punto P4, zona correspondiente al estacionamiento de buses universitarios.

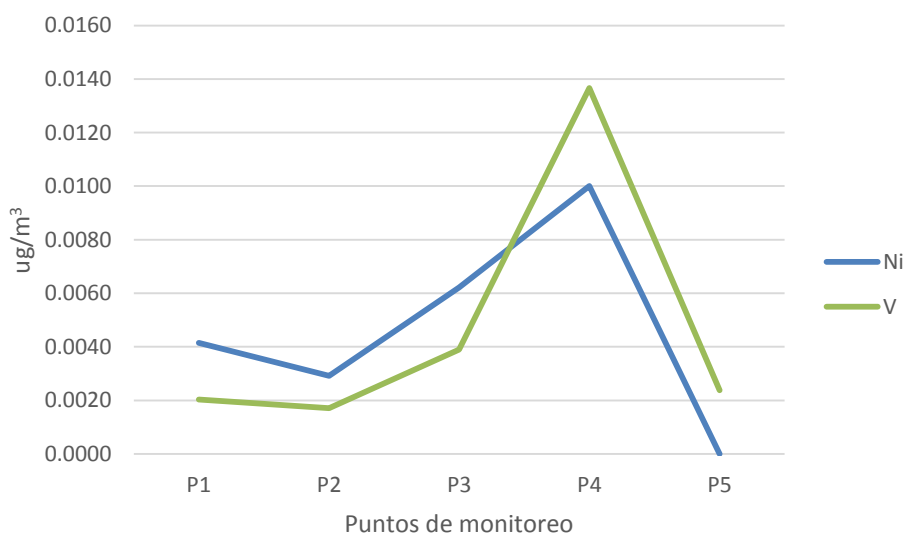


Figura 32. Líneas de concentración del Ni y V

Fuente: Propia.

4.2.2. Concentración de aniones en el PM_{2.5}

Teniendo los datos de radiación solar, se seleccionaron los filtros correspondientes a los días de mayor y menor radiación solar por punto de monitoreo, como se observa en la tabla 6.

Tabla 6. Filtros seleccionados conforme a radiación solar

Punto	Filtro	Rad. Solar (Ly/día)	Fecha de muestreo	Día de muestreo
P1	P1.01	212.2	04/07/2016	Lunes
	P1.06	67.5	14/07/2016	Jueves
P2	P2.06	237.0	28/07/2016	Jueves
	P2.01	85.9	18/07/2016	Lunes
P3	P3.01	270.2	01/08/2016	Lunes
	P3.04	75.2	07/08/2016	Domingo
P4	P4.06	327.5	25/08/2016	Jueves
	P4.01	79.8	15/08/2016	Lunes
P5	P5.07	365.7	10/09/2016	Sábado
	P5.02	95.2	31/08/2016	Miércoles

Fuente: Propia.

Nota: los datos de radiación solar fueron proporcionados por la Estación Meteorológica Alexander Von Humboldt

Habiendo analizado los 10 filtros, se identificó la presencia de nitrato y sulfato. Tales resultados se muestran en las tablas 7 y 8, en donde se observa que la concentración promedio de nitrato en el PM_{2.5} del aire ambiental del campus de la UNALM es 3.70 ug/m³, y la concentración de sulfato es 7.85 ug/m³. Otros aniones como fluoruro o bromuro no fueron detectados. En el caso del cloruro, se detectaron valores muy variantes e inconsistentes, y por ello no se le consideró en el presente análisis; mientras que aniones como fluoruro y bromuro no fueron detectados en el material particulado de la zona.

Tabla 7. Concentración de nitrato y sulfato en muestras

Punto de Monitoreo	Muestra	Aniones (ug/m ³)		Radiación Solar (Ly/día)
		Nitrato	Sulfato	
P1	P1.01	4.83	11.49	212.2
	P1.06	5.44	6.13	67.5
P2	P2.06	4.45	5.16	237.0
	P2.01	4.01	9.25	85.9
P3	P3.01	3.90	12.29	270.2
	P3.04	3.07	8.01	75.2
P4	P4.06	2.45	7.61	327.5
	P4.01	2.36	1.59	79.8
P5	P5.07	3.39	7.36	365.7
	P5.02	2.48	7.96	95.2

Fuente: Propia.

Tabla 8. Concentración promedio de nitrato y sulfato en el PM_{2.5}

Punto de Monitoreo	Aniones (ug/m ³)		
	Nitrato	Sulfato	
P1	5.14	8.81	
P2	4.23	7.21	
P3	3.49	3.64	10.15
P4	2.41	4.60	7.69
P5	2.94	7.66	

Fuente: Propia.

En la figura 33 se observa que el nitrato presentó la mayor concentración en el punto P1 (5.14 ug/m³) mientras que el sulfato presentó la mayor concentración en el punto P3 (10.15 ug/m³). La concentración de sulfato en el PM_{2.5} resalta sobre la de nitrato (y por sobre los metales analizados), concordando con investigaciones como la de Glavas et al. (2008) y SEMARNAT (2011), donde se indica al sulfato como uno de los componentes predominantes del material particulado fino.

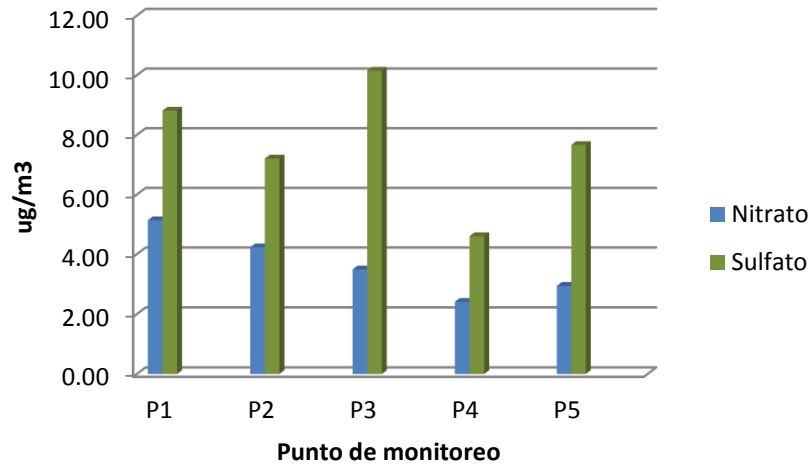


Figura 33. Concentración promedio de nitrato y sulfato por punto de monitoreo

Fuente: Propia.

Con el contenido total aniones (suma de nitrato y sulfato) por punto de monitoreo se elaboró la figura 34, mostrando que el punto P1 presentó la mayor concentración de todos (13.94 ug/m³) pese a que no fue el que presentó la mayor concentración de PM_{2.5}, seguido del punto P3 (13.64 ug/m³), del P2 (11.44 ug/m³), del P5 (10.6 ug/m³), y finalmente del P4 (7.01 ug/m³). El valor promedio del contenido total de aniones (en términos de nitrato y sulfato) en el PM_{2.5} corresponde a 11.32 ug/m³, 22.5% del contenido promedio de PM_{2.5}.

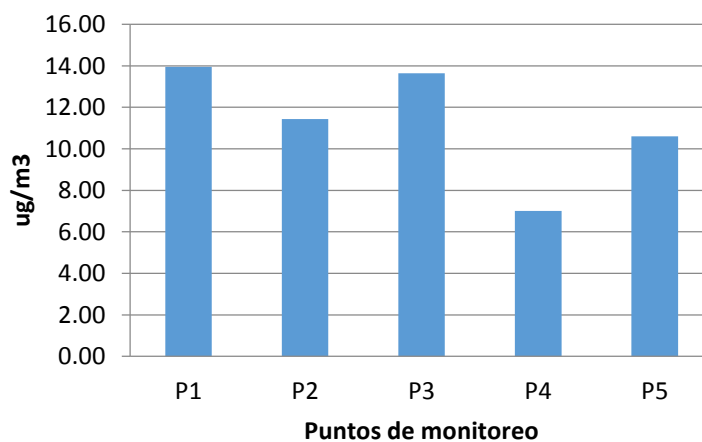


Figura 34. Concentración total de aniones por punto de monitoreo

Fuente: Propia.

Considerando que según SEMARNAT (2011), las formas predominantes del nitrato como aerosol son nitrato de amonio y nitrato de sodio; al contar con datos correspondientes a sodio y nitrato, se optó por hallar el coeficiente de correlación de Spearman entre ambas variables para analizar su relación. El resultado fue un coeficiente de 0.8 a una confiabilidad de 90%, indicando que el sodio y el nitrato tienen una relación positiva fuerte, lo que indicaría una probabilidad alta de que una de las formas predominantes del nitrato en el PM_{2.5} del aire ambiental de la UNALM sea como nitrato de sodio.

4.2.3. Análisis integral de la composición química del PM_{2.5}

A partir de las figuras 6 y 34 se concluye que la composición química del PM_{2.5} no depende de su concentración total, pues el punto P1 presentó la mayor concentración total de metales y de aniones pese a que no fue el que presentó la mayor concentración de PM_{2.5}, y por el contrario, el punto P4 que presentó la mayor concentración de PM_{2.5}, fue el que presentó la menor concentración total de metales y de aniones; confirmando la necesidad de realizar estudios como el que se presenta para entender completamente los impactos que el material particulado pueda ocasionar.

En la tabla 9 se observa la comparación de la composición química del PM_{2.5} de una zona residencial en China (Taian) versus una zona residencial en Perú (Lima – La Molina). Si bien la concentración de PM_{2.5} es casi igual, la composición química del mismo es muy diferente, lo que demuestra que esta última depende altamente de la zona de muestreo, de las variables meteorológicas zonales y de las fuentes de emisión locales. Además se percibe que el material particulado de Taian-China presenta un riesgo potencial mayor que el de Lima-Perú pues la concentración de elementos tóxicos contenidos en el PM_{2.5} es mayor.

Tabla 9. Composición química del PM_{2.5} en Taian y Lima (ug/m³)

	Liu et al. (2015)	Llanos (2016)
Zona	Taian - China	Lima - Peru
PM _{2.5}	51	50.3
SO ₄	24.41	7.85
NO ₃	4.57	3.70
Si	2.73	0.63
Na	1.17	1.72
Ca	0.98	0.43
Fe	0.79	0.21
K	0.57	0.34
Mg	0.24	0.14
Zn	0.17	0.07
Al	0.16	0.16
Pb	0.08	0.01
Cu	0.04	0.01
Mn	0.03	0.01
Cr	0.02	0.004
Ni	0.01	0.01
Ti	0.1	0.01
V	0.1	0.01

Fuente: Propia.

Por otra parte, si bien no se tiene un análisis de todos los componentes químicos presentes en el PM_{2.5} de la zona, a partir de los que se conoce se puede realizar un balance utilizando la ecuación 4 del ítem 5.4.3.

$$50.33 \text{ ug/m}^3 = 3.89 \text{ ug/m}^3 + 11.32 \text{ ug/m}^3 + B$$

$$B = 35.12 \text{ ug/m}^3$$

Se observa que el valor B faltante es superior a la concentración de metales y aniones determinada, lo que significa que aún hay más componentes químicos por ser determinados. En base a lo indicado por SEMARNAT (2011), los probables componentes que conformen al valor B serían: carbono elemental y orgánico, amonio, iones de hidrógeno, agua ligada a partículas, bacterias y virus; pero para afirmar tal probabilidad se requeriría de investigaciones más detalladas.

4.3. Análisis de la influencia de variables meteorológicas sobre la composición química del PM_{2.5}

4.3.1. Análisis de la influencia de la radiación solar sobre la composición química del PM_{2.5}

Para el caso del nitrato se observa en la figura 35 que presenta menor concentración los días con menor radiación solar, a excepción del punto P1; ello se puede ver explicado con lo indicado por Kouyoumdjian y Saliba (2006), quienes indican que ciertos niveles de radiación son necesarios para la formación de HNO₃ atmosférico el cual es precursor del nitrato de amonio.

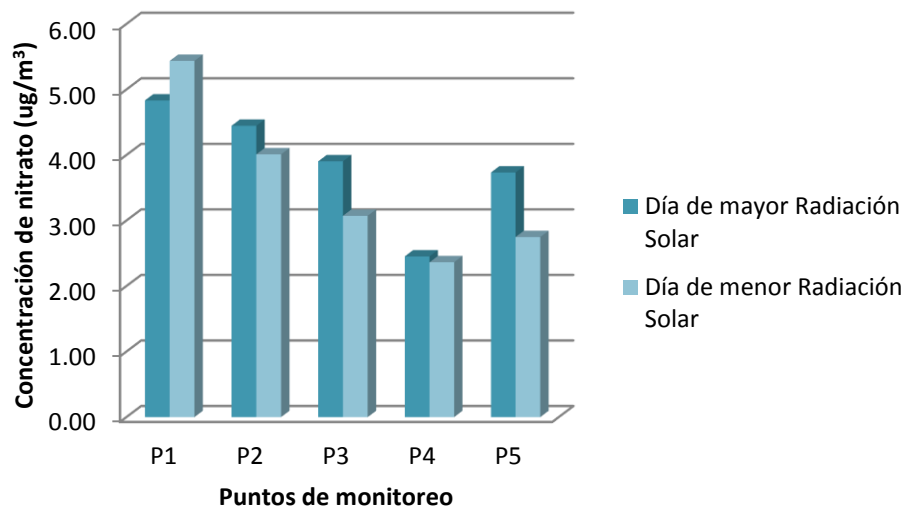


Figura 35. Relación del nitrato y la radiación solar

Fuente: Propia

Por otra parte, para el caso del sulfato su contenido es variante. Se identifica en la figura 36 que solo en el punto P1, P3 y P4 cumple lo expuesto por Kouyoumdjian y Saliba (2006) y Liu et al. (2015), presentando mayor concentración los días de mayor radiación. Para el caso de este componente no se encontró una relación gráfica con la radiación solar de la zona, lo que indica que las variables que afectan su concentración son diversas.

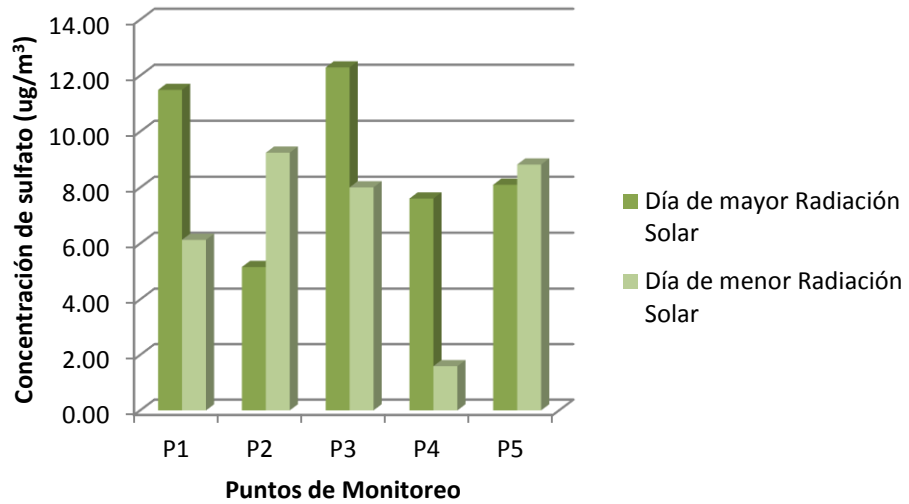


Figura 36. Relación del sulfato y la radiación solar

Fuente: Propia

4.3.2. Análisis de la influencia del viento sobre la composición química del PM_{2.5}

Utilizando el *software* WR Plot se elaboró la rosa de vientos correspondiente al periodo de monitoreo del 04 de Julio al 10 de Setiembre del 2016. En ella se observa que la dirección predominante de las masas de aire es sudoeste (ver figura 37).

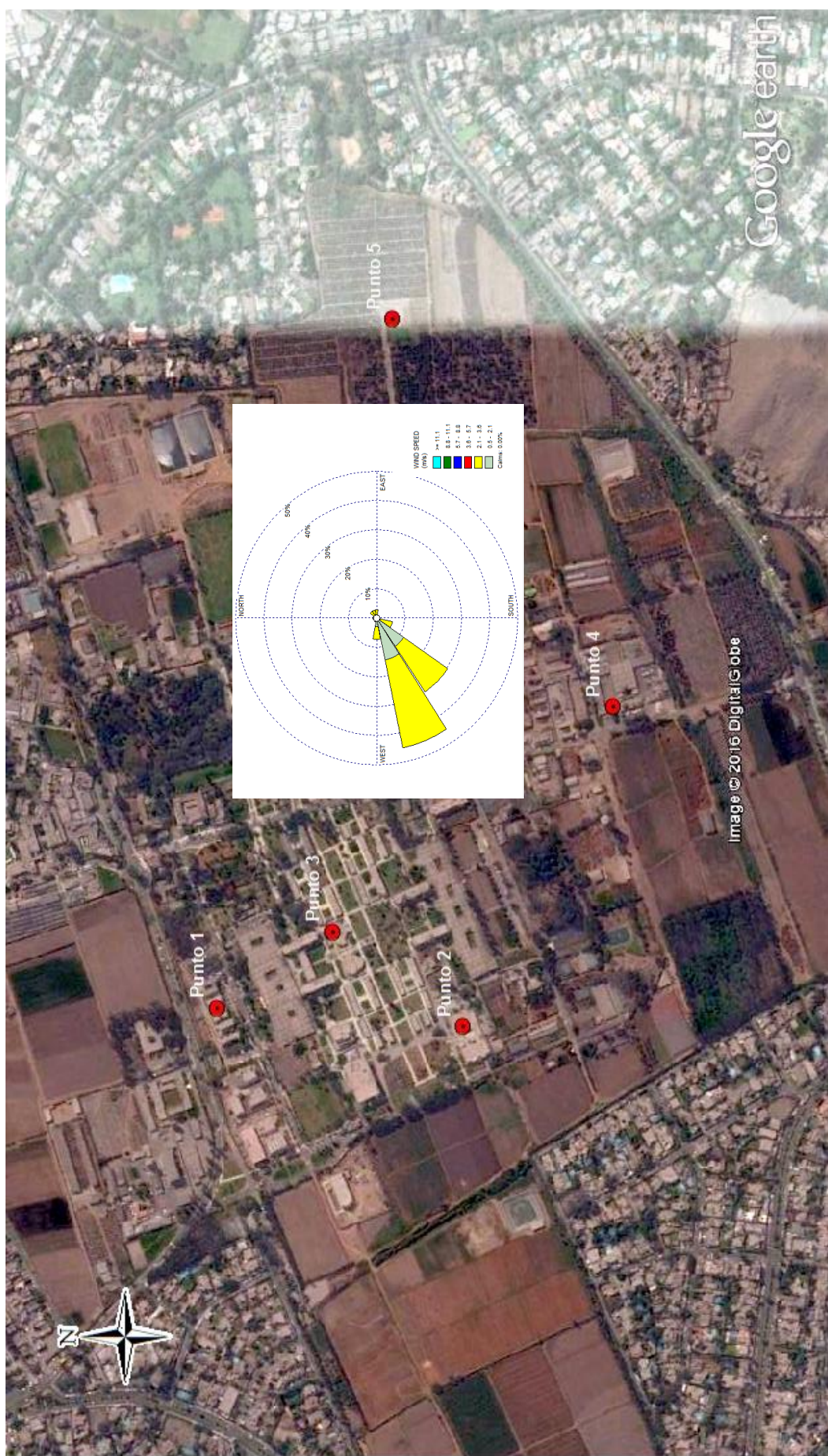


Figura 37. Rosa de vientos correspondiente al periodo de monitoreo
 Fuente: Propia, utilizando el software Google Earth, el software versión de prueba ArcGIS y el software WR Plot

Dicha dirección del viento indica que la zona, y por ende los puntos de monitoreo, están influenciados por masas de viento, que probablemente transporten contaminantes, provenientes del sudoeste.

Por otra parte, en cuanto al contenido químico del material particulado el punto P5 es el que presenta mayores “picos” en cada análisis individual de los metales, ocurriendo ello con el Fe (figura 17), Mg (figura 18), Al (figura 19), , Mn (figura 22), Cu (figura 23), Ti (figura 24), Ba (figura 26) y Mo (figura 29). Además en cuanto al contenido total metálico se observa en la figura 6 que dicho contenido va disminuyendo del punto P1 al punto P4 (conforme se va alejando de la avenida La Molina) a excepción del punto P5, donde vuelve a subir; mientras que con el contenido total de aniones se observa en la figura 34 que el punto P5 no es el que presenta la menor concentración. Todo ello indica que existe la probabilidad de un arrastre de componentes químicos hacia el punto P5 por efecto de la dirección del viento, pero no se refleja en la concentración total del PM_{2.5} probablemente porque las velocidades del viento son bajas y solo permiten el arrastre de los componentes más finos (metales, aniones, etc.).

4.3.3. Análisis de la influencia de otras variables meteorológicas sobre la composición química del PM_{2.5}

En cuanto a precipitación se observó que de los 15 filtros seleccionados, para análisis de metales y aniones, solo los filtros P4.04 y P5.03, en el caso de metales, y P4.01 y P5.02, en el caso de aniones, presentaron mm de precipitación durante los días de su monitoreo. Sin embargo, no se identificó un patrón común con respecto a tal variable meteorológica por lo que la influencia de la precipitación sobre la composición química no ha sido considerada en la presente investigación. Además, durante el periodo de monitoreo ningún evento de precipitación supera 1 mm; concordando con Pu et al. (2011) acerca de que precipitaciones menores a tal valor tienen una influencia muy baja sobre el material particulado.

Por su parte, tanto la humedad relativa como la temperatura presentaron un comportamiento aproximadamente uniforme durante el periodo de monitoreo por lo que no se pudo identificar su influencia sobre los componentes químicos del PM_{2.5}. Sin embargo, se recomienda la realización de estudios con un periodo mayor de monitoreo para identificar tales influencias pues, por ejemplo, se conoce que la humedad relativa alta puede favorecer la presencia de sulfatos y nitratos en la atmósfera (Zhang et al., 2016).

4.4. Identificación de posibles orígenes de contaminación que influyan en la composición química del PM_{2.5}

Utilizando un mapa de la zona y habiendo realizado una identificación de las áreas de la misma, se elaboró la figura 38 en donde se divide al aérea de estudio en tres zonas, cada color representa un tipo de zona. Así, el color rojo representa las zonas urbanas y de tránsito vehicular que favorecen las emisiones provenientes de quema de combustibles fósiles, el color amarillo representa las zonas agrícolas o de superficie expuesta que favorecen el levantamiento de polvo, y el color celeste representa el campus de la universidad (edificios, salones, etc.) en donde se encuentra la población de mayor exposición.

A partir de la identificación de áreas con terreno descubierto o campos de cultivo (color amarillo de la figura 38), se podría explicar el por qué la presencia predominante de elementos de corteza en el PM_{2.5} de la zona como lo son, según Liu et al. (2015), el sodio, el silicio, el calcio, el potasio, el hierro, el magnesio y el aluminio; pues el levantamiento de polvo (y por ende de tales elementos) por acción eólica es más factible en dichas áreas.

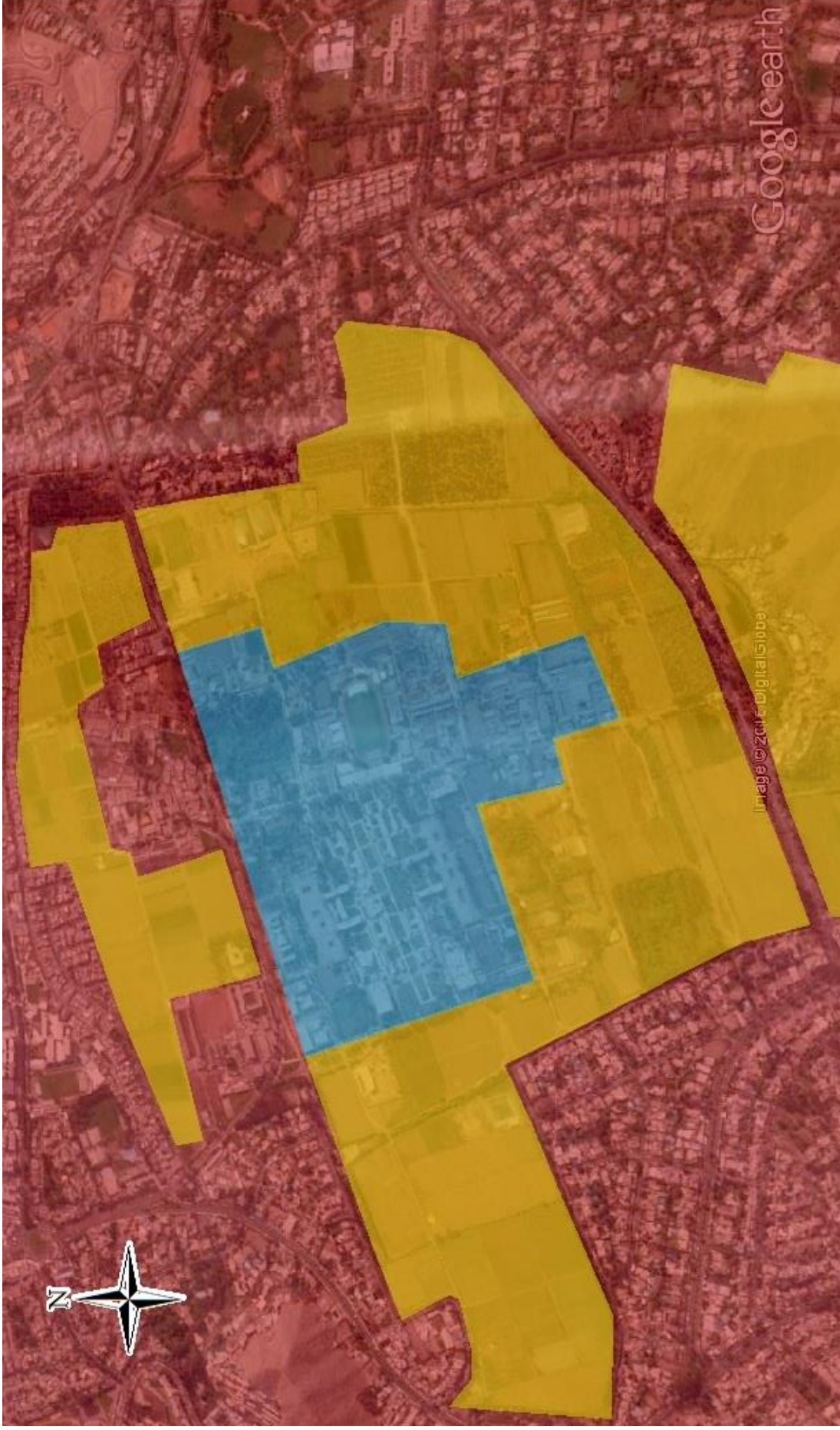


Figura 38. Zonas identificadas en el entorno del campus de la UNALM
Fuente: Propia, utilizando el software Google Earth y el software versión de prueba ArcGIS

La zona donde se realizó el monitoreo es del tipo residencial, lo que significa que la influencia de emisiones de industrias y comercio es probablemente menor que la del parque automotor. Sin embargo, factores como la dirección del viento pueden influir en la composición química del material particulado de una zona pues arrastran materiales de zonas ajenas. Así, en la figura 39 se observa la rosa de vientos superpuesta sobre un mapa de la zona a mayor escala, en donde se observa que el viento puede estar arrastrando contaminación atmosférica proveniente de avenidas como Circunvalación, Primavera, San Luis, Aviación y Angamos, las cuales son altamente transitadas en la ciudad de Lima, lo que explicaría la presencia de metales traza como el Zn, Pb, Mn, Cu, Ni, V y Cr en el material particulado de la zona pues Jiang et al. (2015) indicaron que metales como los mencionados están relacionados al parque automotor y a la quema de combustibles fósiles, y Almeida et al. (2015) relacionan a algunos de ellos con el desgaste de los frenos durante el tránsito de vehículos.

Además, considerando que la zona de monitoreo corresponde a una zona costera y que las masas de viento provienen desde la dirección en donde está ubicado el mar (figura 39), las concentraciones de sodio y de sulfato pueden verse influenciadas por aerosoles marinos, pues dichos elementos están relacionados a tal origen según Almeida et al. (2015) para el caso del sodio y SEMARNAT (2011) para el caso de sulfatos.



Figura 39. Rosa de vientos a mayor escala

Fuente: Propia, utilizando el software Google Earth y el software WR Plot

Por otra parte, a partir de la figura 31 se realizaron análisis más profundos. Uno de ellos fue utilizando el coeficiente de correlación de Spearman (resultados en la tabla 10) en donde se observa que la correlación entre los metales Cu, Mn, Mo y Zn es probablemente fuerte (siendo la relación de menor intensidad aquella entre Cu y Zn) lo que sugiere que exista la posibilidad de que tales metales provengan de una origen en común. Si a ello se le suma que según Jiang et al. (2015), Machado et al. (2008) y Contini et al. (2014) tales metales tienen relación a emisiones vehiculares, se podría inferir entonces que provienen probablemente del parque automotor que circula cercano a la zona de monitoreo o en zonas de donde vienen las masas de viento.

Tabla 10. Resultados de pruebas de correlación con metales

Relación	Coef. Spearman	Valor p	Valor alfa asignado	Interpretación
Cu - Mn	0.9	0.037	0.05	Relación positiva fuerte al 95% de confiabilidad
Cu - Mo	0.8	0.104	0.15	Relación positiva fuerte al 85% de confiabilidad
Cu - Zn	0.6	0.285	0.30	Relación positiva fuerte al 70% de confiabilidad
Mn - Mo	0.9	0.037	0.05	Relación positiva fuerte al 95% de confiabilidad
Mn - Zn	0.8	0.104	0.15	Relación positiva fuerte al 85% de confiabilidad
Mo - Zn	0.9	0.037	0.05	Relación positiva fuerte al 95% de confiabilidad

Fuente: Propia.

Otro de los análisis fue superponer en la figura 31 los días de monitoreo correspondientes a los filtros analizados. Así se observa en el figura 40 que los días en donde se presentan los picos altos de concentración de metales corresponden a días de semana (jueves y viernes); mientras que los días en donde se presentan los picos bajos de concentración corresponden a días de fin de semana (sábado, domingo). Ello sugiere que las concentraciones de tales metales están relacionadas con orígenes antropogénicos, pues estos presentan mayor actividad durante días de semana. En tal caso, se llegaría a reforzar la idea de que dichos metales están

relacionados a emisiones del parque automotor, pues este presenta mayor actividad durante los días de semana.

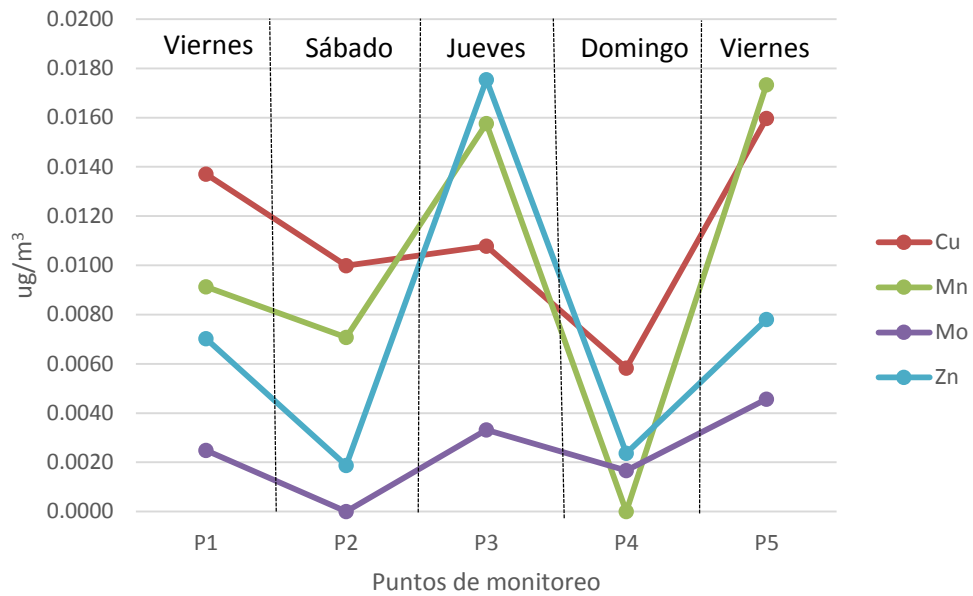


Figura 40. Concentración de metales relacionada a días de monitoreo
Fuente: Propia.

Por otro lado, en la figura 32 se evidenció un comportamiento similar entre el níquel y el vanadio, teniendo ambos un pico en el punto P4. A través del coeficiente de correlación de Spearman se comprobó que ambos tienen una relación positiva fuerte (0.7 a una confiabilidad de 80%), lo que da la probabilidad de que provengan de un mismo origen. En base a ello, se examinó la zona correspondiente al punto P4 y se observó que existe una estación de servicio (grifo) cerca; consultando al personal responsable se conoció que dicho grifo brinda abastecimiento de gasolina y diésel. Además en dicha zona se ubica también una laboratorio de biocombustibles donde se realizan ensayos con biodiesel. Todo ello apunta a una relación estrecha con el uso de combustibles fósiles; la cual explicaría la presencia de níquel y vanadio en la zona pues investigaciones como las de Dominici et al. (2007) y Geiger y Cooper (2010) relacionan al vanadio y al níquel a un mismo origen, el cual a su vez es la quema de combustibles fósiles especialmente de aceites y derivados del petróleo (como el diésel). Cabe resaltar que el personal que labora en el punto P4 puede verse involucrado en una situación

de riesgo puesto que Dominici et al. (2007) en su investigación indican que el efecto de mortalidad causado por el material particulado se puede ver aumentado cuando este contiene altas dosis de níquel y vanadio.

Por otro lado, el potasio puede servir como indicador de influencia de la quema de biomasa en el material particulado (Duan et al., 2004). En la tabla 5 se observa que el potasio ocupa la 4ta posición como elemento predominante en el PM_{2.5} de la zona y ello podría deberse a la influencia de la quema de biomasa, considerando que eventualmente se practica la quema de maleza en los campos de la UNALM. Además, los puntos de monitoreo que presentaron mayor concentración fueron el P2, P3 y P1, los cuales tienen campos de cultivo y al Centro de Ventas UNALM (zona que abarca restaurantes donde algunos utilizan leña) localizados en dirección de donde sopla el viento (ver figura 37), lo que sugiere que las masas de viento traen emisiones provenientes de quema de biomasa conteniendo potasio. Un análisis del carbono orgánico del PM_{2.5} sería necesario para confirmar tales situaciones.

En cuanto al contenido de aniones, la presencia de sulfato en el material particulado se puede deber a influencia de aerosoles marinos transportados por las masas de aire (como se observa en la figura 39), o por la quema de combustibles fósiles en actividades antrópicas, según SEMARNAT (2011). Además dicha publicación indica que el origen del nitrato en el material particulado es principalmente proveniente de los tubos de escape de carros, ello explicaría el por qué en la figura 33 el punto P1 presenta mayor concentración de nitrato, pues es el punto más cercano a una avenida principal.

Por otra parte, los fertilizantes conteniendo nitrógeno y el estiércol animal pueden ser considerables emisores de óxidos de nitrógeno y amoníaco (FAO, 2004). Considerando que tales compuestos se transforman a nitrato en la atmósfera (SEMARNAT, 2011), podría ello explicar el alza de nitrato en el punto P5 pues este cuenta en su cercanía con amplios campos de cultivo en donde, de acuerdo a lo

indicado por los agricultores de la zona, el abono que utilizan consiste básicamente en estiércol animal y úrea, los cuales son grandes aportantes de nitrógeno a la atmósfera. Además, la granja de animales, en donde abunda el ganado vacuno, está ubicada en dirección en donde sopla el viento (hacia el punto P5), por lo que las emisiones correspondientes al estiércol vacuno también podrían estar aportando al contenido de nitrato.

V. CONCLUSIONES

1. El valor promedio del contenido metálico en el $PM_{2.5}$ del aire ambiental del campus de la UNALM corresponde a 3.89 ug/m^3 (7.7% del contenido promedio de $PM_{2.5}$), presentando el punto P1, el más cercano a una avenida principal, la mayor concentración total de metales.
2. El valor promedio del contenido total de aniones (en términos de nitrato y sulfato) en el $PM_{2.5}$ del aire ambiental del campus de la UNALM corresponde a 11.32 ug/m^3 (22.5% del contenido promedio de $PM_{2.5}$) resaltando la concentración de sulfato por sobre la de nitrato en todos los puntos de monitoreo y presentando el punto P1, el más cercano a una avenida principal, la mayor concentración total de aniones.
3. Las concentraciones de los metales en el $PM_{2.5}$ del aire ambiental del campus de la UNALM no son de carácter alarmante, pero sí ameritan atención pues el Zn superó su valor típico urbano (VTU) en uno de los puntos de monitoreo; el Fe, Zn, Mn, Cu, Cr, Ni y V superaron su valor típico rural (VTR) en al menos un punto de monitoreo; y el Ni igualó su valor de riesgo mínimo de cáncer (RC) en uno de los puntos de monitoreo.
4. La composición química del $PM_{2.5}$ no depende de su concentración total, pues el punto P1 presentó la mayor concentración total de metales y de aniones pese a que no fue el que presentó la mayor concentración de $PM_{2.5}$, y por el contrario, el punto P4 que presentó la mayor concentración de $PM_{2.5}$, fue el que presentó la menor concentración total de metales y de aniones; confirmando la necesidad de realizar

estudios como el que se presenta para entender completamente los impactos que el material particulado pueda ocasionar.

5. La composición química del $PM_{2.5}$ depende de la zona de muestreo, de las variables meteorológicas zonales y de las fuentes de emisión locales, pues pese a que la concentración de $PM_{2.5}$ en una zona residencial en China y en La Molina-Lima es casi igual, la composición química del $PM_{2.5}$ en ambas es muy diferente.
6. En la zona de muestreo la radiación solar presentó una relación directa con el contenido de nitratos del $PM_{2.5}$ del aire ambiental del campus de la UNALM sugiriendo existencia de influencia de la misma sobre la concentración de dicho anión.
7. La composición química del $PM_{2.5}$ del aire ambiental del campus de la UNALM está influenciada por masas de aire provenientes del sur-oeste en donde existe influencia de emisiones del parque automotor y aerosoles marinos.
8. El metal predominante en el $PM_{2.5}$ del aire ambiental del campus de la UNALM es el sodio (Na) y entre su posible origen principal de contaminación está el levantamiento de polvo de campos de cultivo y zonas de superficie; a este le siguen en predominancia metales como silicio (Si), calcio (Ca), potasio (K), fósforo (P), hierro (Fe) y magnesio (Mg).
9. Presencia de los metales aluminio (Al), zinc (Zn), plomo (Pb), manganeso (Mn), cobre (Cu), titanio (Ti), cromo (Cr), bario (Ba), níquel (Ni), vanadio (V), molibdeno (Mo) y estroncio (Sr) y de los aniones sulfato y nitrato en el $PM_{2.5}$ del aire ambiental del campus de la UNALM pueden tener como posible origen de contaminación a las emisiones del parque automotor.

VI. RECOMENDACIONES

- 1.** Realizar estudios complementarios para comprobar si la presencia de As, Sn, Ce y Li se debe a la zona de muestreo y/o a fuentes externas, o a interferencias y/o contaminación durante su análisis de detección.
- 2.** Realizar estudios complementarios para determinar los componentes químicos que constituyen el peso faltante (35.12 ug/m^3) del $\text{PM}_{2.5}$ del aire ambiental del campus la UNALM.
- 3.** Monitorear la zona por un periodo de tiempo mayor que permita determinar la influencia de todos las variables meteorológicas que afectan la composición química del $\text{PM}_{2.5}$
- 4.** En base a lo planteado en la presente investigación, se recomienda complementarla con estudios epidemiológicos pertinentes.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Almeida, S.; Lage, J.; Fernández, B.; García, S.; Reis, M.; Chaves, P. 2015. Chemical characterization of atmospheric particles and source apportionment in the vicinity of a steelmaking industry. *Science of the Total Environment* 521-522: 411-420. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.03.112>
2. Baltensperger, U. y Hertz, J. 1985. Determination of anions and cations in atmospheric aerosols by single column ion chromatography. *Journal of Chromatography* 324: 153-161. doi:10.1016/S0021-9673(01)81314-5
3. Chen, P.; Bi, X.; Zhang, J.; Wu, J.; Feng, Y. 2014. Assessment of heavy metal pollution characteristics and human health risk of exposure to ambient PM_{2.5} in Tianjin, China. *Particuology*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.partic.2014.04.020>
4. Contini, D.; Cesari, D.; Donato, A.; Chirizzi, D.; Belosi, F. 2014. Characterization of PM₁₀ and PM_{2.5} and their metals content in different typologies of sites in South-Eastern Italy. *Atmosphere* 5: 435-453. doi:10.3390/atmos5020435
5. DIGESA: Dirección General de Salud Ambiental. 2005. Protocolo de Monitoreo de la Calidad del Aire y Gestión de los Datos. Lima, PE. 71 p. Recuperado de http://www.digesa.sld.pe/norma_consulta/protocolo_calidad_de_aire.pdf

6. DIGESA: Dirección General de Salud Ambiental. 2012. II Estudio de Saturación de Lima Metropolitana y Callao Año 2011. Lima, PE. 66 p. Recuperado de http://www.digesa.minsa.gob.pe/depa/informes_tecnicos/Estudio%20de%20Saturacion%202012.pdf

7. Dominici, F.; Peng, R.; Ebisu, K.; Zeger, S.; Samet, J.; Bell, M. 2007. Does the effect of PM₁₀ on mortality depend on PM nickel and vanadium content? *Environ Health Perspect* 115: 1701-1703. doi:10.1289/ehp.10737

8. Duan, F.; Liu, X.; Yu, T.; Cachier, H. 2004. Identification and estimate of biomass burning contribution to the urban aerosol organic carbon concentrations in Beijing. *Atmospheric Environment* 38: 1275-1282. doi:10.1016/j.atmosenv.2003.11.037

9. FAO: Food and Agriculture Organization of the United Nations. 2004. Estimaciones globales de las emisiones gaseosas de NH₃, NO y NO₂ provenientes de las tierras agrícolas. 120 p. Recuperado de <http://www.fao.org/3/a-y2780s.pdf>

10. Geiger, A. y Cooper, J. 2010. Appendix C: Overview of airborne metals regulations, exposure limits, health effects and contemporary research. Recuperado de <https://www3.epa.gov/ttnemc01/prelim/otm31appC.pdf>

11. Glavas, S.; Nikolakis, P.; Ambatzoglou, D.; Mihalopoulos, N. 2008. Factors affecting the seasonal variation of mass and ionic composition of PM_{2.5} at a central Mediterranean coastal site. *Atmospheric Environment* 42: 5365-5373. doi:10.1016/j.atmosenv.2008.02.055

12. Grupo de Ingeniería Química. 2006. Determinación de partículas en suspensión y metales pesados en muestras de aire. Universidad del País Vasco. San Sebastián, ES. 27 p. Recuperado de https://www.durango-udala.net/portaldurango/RecursosWeb/DOCUMENTOS/1/0_1025_1.pdf
13. INDECOPI. 2003. NTP: 900.003.2003: Método de referencia para la determinación de material particulado respirable como PM₁₀ en la atmósfera. Lima, PE. 20 p.
14. Jiang, S.; Kaul, D.; Yang, F.; Sun, L.; Ning, Z. 2015. Source apportionment and water solubility of metals in size segregated particles in urban environments. *Science of the Total Environment* 53: 347-355. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.06.146>
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. doi:10.1016/j.atmosres.2009.12.009
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. www.atmos-chem-phys.net/6/1865/2006/
17. Liu, B.; Song, N.; Dai, Q.; Mei, R.; Sui, B.; Bi, X.; Feng, Y. 2015. Chemical composition and source apportionment of ambient PM_{2.5} during the non-heating period in Tain, China. *Atmospheric Research* 170: 23-33. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2015.11.002>

18. Machado, A.; García, N.; García, C.; Acosta, L.; Córdova, A.; Linares, M.; Giraldoth, D.; Velásquez, H. 2008. Contaminación por metales (Pb, Zn, Ni y Cr) en aire, sedimentos viales y suelo en una zona de alto tráfico vehicular. *Revista Internacional de Contaminación* vol. 24 no. 4. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992008000400003
19. MINAM: Ministerio del Ambiente de Perú. 2011. Plan nacional de acción ambiental (PLANAA – Perú 2011-2021). Lima, PE. 80 p. Recuperado de http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2013/08/plana_2011_al_2021.pdf
20. MINAM: Ministerio del Ambiente de Perú. s.f. Informe nacional de la calidad del aire 2013-2014. Lima, PE. 52 p. Recuperado de <http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2016/07/Informe-Nacional-de-Calidad-del-Aire-2013-2014.pdf>
21. OCDE: Organización de Cooperación y Desarrollo Económico. 2016. Evaluación del desempeño ambiental Perú 2016. 79 p. Recuperado de <https://www.oecd.org/environment/country-reviews/16-00313%20Evaluacion%20desempeno-Peru-WEB.pdf>
22. 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* vol. 77 n° 2: 273-283.
23. Pateraki, S.; Asimakopoulos, D.; Bougiatioti, A.; Maggos, TH.; Vasilakos, CH.; Mihalopoulos, N. 2014. Assessment of PM_{2.5} and PM₁ chemical profile in a multiple-impacted Mediterranean urban area: Origin, sources and meteorological dependence. *Science of the Total Environment* 479-480: 210-220. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.02.008>

24. Pillai, P.; Suresh, S.; Moorthy, K. 2002. A study of PM, PM10 and PM2.5 concentration at a tropical coastal station. *Atmospheric Research* 61: 149-167. [http://dx.doi.org/10.1016/S0169-8095\(01\)00136-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0169-8095(01)00136-3)
25. Pu, W.; Zhao, X.; Zhang X.; Ma Z. 2011. Effect of Meteorological Factors on PM_{2.5} during July to September of Beijing. *Procedia Earth and Planetary Science* 2: 272-277. doi: 10.1016/j.proeps.2011.09.043
26. SEMARNAT: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 2011. Guía metodológica para la estimación de emisiones de PM_{2.5}. México. 106 p. Recuperado de http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/consultaPublicacion.html?id_pub=695
27. SENAMHI: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. 2011. Evaluación de la calidad del aire en Lima Metropolitana 2011. Lima, PE. 69 p. Recuperado de http://www.senamhi.gob.pe/usr/dgia/pdf_dgia_eval2011.pdf
28. USGPO: United States Government Publishing Office. 2016. Title 40 - Part 50 – Appendix L: Reference Method for the Determination of Fine Particulate Matter as PM_{2.5} in the Atmosphere (en línea). Washington D.C., US. Consultado 29 may. 2016. Recuperado de <http://www.ecfr.gov/cgi-bin/retrieveECFR?gp=&SID=2a7db579eec6e9cbd23ec258079457f2&mc=true&n=pt40.2.50&r=PART&ty=HTML>
29. Vila, A.; Sedano, M.; López, A.; Juan, A. s.f. Correlación lineal y análisis de regresión. 21 p. Recuperado de <http://www.uoc.edu/in3/emath/docs/RegresionLineal.pdf>

30. Wang, P.; Cao, J.; Shen, Z.; Han, Y.; Lee, S.; Huang, Y.; Zhu, C.; Wang, Q.; Xu, H.; Huang, R. 2014. Spatial and seasonal variations of PM_{2.5} mass and species during 2010 in Xi'an, China. *Science of the Total Environment* 508: 477-487. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.11.007>
31. Zhai, Y.; Liu, X.; Chen, H.; Xu, B.; Zhu, L.; Li, C.; Zeng, G. 2014. Source identification and potential ecological risk assessment of heavy metals in PM_{2.5} from Changsha. *Science of the Total Environment* 493: 109-115. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.05.106>
32. Zhang, Z.; Zhang, X.; Gong, D.; Quan, W.; Zhao, X.; Ma, Z.; Kim, S. 2015. Evolution of surface O₃ and PM_{2.5} concentrations and their relationships with meteorological conditions over the last decade in Beijing. *Atmospheric Environment* 108: 67-75. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.02.071>
33. Zhang, Y.; Huang, W.; Cai, T.; Fang, D.; Wang, Y.; Song, J.; Hu, M.; Zhang, Y. 2016. Concentrations and chemical compositions of fine particles (PM_{2.5}) during haze and non-haze days in Beijing. *Atmospheric Research* 174-174: 62-69. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.02.003>

VIII. ANEXOS

Anexo 1. Cálculos para la determinación de la concentración promedio de PM_{2.5}

Fecha	Muestra	Concentración de PM _{2.5} por punto (ug/m ³)	Concentración promedio de PM _{2.5} por punto (ug/m ³)	Concentración promedio de PM _{2.5} (ug/m ³)
04/07/2016	P1.01	36.85		
06/07/2016	P1.02	53.74		
08/07/2016	P1.03	66.44		
10/07/2016	P1.04	45.75	50.33	
12/07/2016	P1.05	37.47		
14/07/2016	P1.06	58.11		
16/07/2016	P1.07	53.94		
18/07/2016	P2.01	45.72		
20/07/2016	P2.02	49.75		
22/07/2016	P2.03	53.66		
24/07/2016	P2.04	66.34	52.76	
26/07/2016	P2.05	33.24		
28/07/2016	P2.06	49.92		
30/07/2016	P2.07	70.71		
01/08/2016	P3.01	49.93		
03/08/2016	P3.02	37.35		
05/08/2016	P3.03	49.74		
07/08/2016	P3.04	49.69	48.61	50.33
09/08/2016	P3.05	49.82		
11/08/2016	P3.06	53.90		
13/08/2016	P3.07	49.81		
15/08/2016	P4.01	33.18		
17/08/2016	P4.02	49.78		
19/08/2016	P4.03	49.90		
21/08/2016	P4.04	79.16	53.73	
23/08/2016	P4.05	65.15		
25/08/2016	P4.06	41.52		
27/08/2016	P4.07	57.46		
29/08/2016	P5.01	41.46		
31/08/2016	P5.02	45.79		
02/09/2016	P5.03	62.29		
04/09/2016	P5.04	54.13	46.21	
06/09/2016	P5.05	37.32		
08/09/2016	P5.06	36.76		
10/09/2016	P5.07	45.74		

Anexo 2. Resultados de análisis de laboratorio para la determinación del contenido metálico del PM_{2.5}



INFORME DE ENSAYO N° 162038

Nombre del Cliente : CESAR MANUEL LLANOS PUGA
 Dirección : Reservado por el cliente
 Solicitado Por : CESAR MANUEL LLANOS PUGA
 Referencia : Cotización N° 1383-16R01
 Proyecto : Tesis: "Análisis de la Composición Química del PM 2.5 en el aire del Campus de la UNALM"
 Procedencia : Universidad Agraria la Molina
 Muestreo Realizado Por : El Cliente
 Cantidad de Muestra : 1
 Producto : Calidad de Aire
 Fecha de Recepción : 2016/07/23
 Fecha de Ensayo : 2016/07/23 al 2016/08/02
 Fecha de Emisión : 2016/08/02

La muestra fue recepcionada en buenas condiciones

I. Resultados

Tipo Ensayo		Unidad	L.D.M.	Resultados
Metales (ICP-AES) - PM 2.5 Bajo Volumen				
Ag	Plata	µg/filtro	0,004	<0,004
Al	Aluminio	µg/filtro	0,04	2,30
As	Arsénico	µg/filtro	0,20	0,86
B	Boro	µg/filtro	1,0	<1
Ba	Bario	µg/filtro	0,007	0,309
Be	Berilio	µg/filtro	0,007	<0,007
Ca	Calcio	µg/filtro	0,2	18,0
Cd	Cadmio	µg/filtro	0,009	<0,009
Ce	Cerio	µg/filtro	0,01	0,42
Co	Cobalto	µg/filtro	0,02	<0,02
Cr	Cromo	µg/filtro	0,008	0,109
Cu	Cobre	µg/filtro	0,01	0,39
Fe	Hierro	µg/filtro	0,01	3,59
K	Potasio	µg/filtro	0,08	7,68
Li	Litio	µg/filtro	0,006	<0,006
Mg	Magnesio	µg/filtro	0,06	3,05
Mn	Manganeso	µg/filtro	0,01	0,22
Mo	Molibdeno	µg/filtro	0,01	0,06
Na	Sodio	µg/filtro	0,3	59,9
Ni	Níquel	µg/filtro	0,01	0,10
P	Fósforo	µg/filtro	0,3	7,3
Pb	Plomo	µg/filtro	0,03	0,36
Sb	Antimonio	µg/filtro	0,1	<0,1
Se	Selenio	µg/filtro	0,2	<0,2
Si	Silicio	µg/filtro	0,1	25,3
Sn	Estaño	µg/filtro	0,05	0,18
Sr	Estroncio	µg/filtro	0,006	0,076
Ti	Titanio	µg/filtro	0,008	0,058
Tl	Talio	µg/filtro	0,5	<0,5
V	Vanadio	µg/filtro	0,007	0,049
Zn	Zinc	µg/filtro	0,04	2,29

Leyenda: L.D.M. = Límite de detección del método, "<"= Menor que el L.D.M. indicado, ">" = Mayor al rango lineal permitido por la técnica analítica, "..."= No Analizado
 "<="= Menor que el L.D.M. indicado, ">=" = Mayor al rango lineal permitido por la técnica analítica.

INFORME DE ENSAYO N° 162126

Nombre del Cliente : CESAR MANUEL LLANOS PUGA
 Dirección : Reservado por el cliente
 Solicitado Por : CESAR MANUEL LLANOS PUGA
 Referencia : Cotización N° 1383-16R01
 Proyecto : Tesis: "Análisis de la Composición Química del PM 2.5 en el aire del Campus de la UNALM"
 Procedencia : Universidad Agraria la Molina
 Muestreo Realizado Por : El Cliente
 Cantidad de Muestra : 1
 Producto : Calidad de Aire
 Fecha de Recepción : 2016/08/06
 Fecha de Ensayo : 2016/08/06 al 2016/08/11
 Fecha de Emisión : 2016/08/11

La muestra fue recepcionada en buenas condiciones

I. Resultados

Código de Laboratorio	162126-1
Código de Cliente	P2.07
Fecha de Muestreo	30/07/2016
Hora de Muestreo (h)	00:00
Tipo de Producto	Filtro

Tipo Ensayo	Unidad	L.D.M.	Resultados
Metales (ICP-AES) - PM 2,5 Bajo Volumen			
Ag Plata	µg/filtro	0,004	<0,004
Al Aluminio	µg/filtro	0,04	3,73
As Arsénico	µg/filtro	0,2	<0,2
B Boro	µg/filtro	1	<1
Ba Bario	µg/filtro	0,007	0,186
Be Berilio	µg/filtro	0,007	<0,007
Ca Calcio	µg/filtro	0,2	21,3
Cd Cadmio	µg/filtro	0,009	<0,009
Ce Cerio	µg/filtro	0,01	<0,01
Co Cobalto	µg/filtro	0,02	<0,02
Cr Cromo	µg/filtro	0,008	0,120
Cu Cobre	µg/filtro	0,01	0,30
Fe Hierro	µg/filtro	0,01	4,92
K Potasio	µg/filtro	0,08	11,60
Li Litio	µg/filtro	0,006	<0,006
Mg Magnesio	µg/filtro	0,06	4,66
Mn Manganeso	µg/filtro	0,01	0,17
Mo Molibdeno	µg/filtro	0,01	<0,01
Na Sodio	µg/filtro	0,3	52,6
Ni Níquel	µg/filtro	0,01	0,07
P Fósforo	µg/filtro	0,3	4,7
Pb Plomo	µg/filtro	0,03	0,34
Sb Antimonio	µg/filtro	0,1	<0,1
Se Selenio	µg/filtro	0,2	<0,2
Si Silicio	µg/filtro	0,1	17,0
Sn Estaño	µg/filtro	0,05	<0,05
Sr Estroncio	µg/filtro	0,006	0,083
Ti Titanio	µg/filtro	0,008	0,126
Tl Talio	µg/filtro	0,5	<0,5
V Vanadio	µg/filtro	0,007	0,041
Zn Zinc	µg/filtro	0,04	1,05

Leyenda: L.D.M. = Límite de detección del método, "<"= Menor que el L.D.M. indicado, ">" = Mayor al rango lineal permitido por la técnica analítica, "—"= No Analizado
 "<="= Menor que el L.D.M. indicado, ">" = Mayor al rango lineal permitido por la técnica analítica.

INFORME DE ENSAYO
Nº 162245

Nombre del Cliente : CESAR MANUEL LLANOS PUGA
 Dirección : Reservado por el cliente
 Solicitado Por : CESAR MANUEL LLANOS PUGA
 Referencia : Cotización N° 1383-16R01
 Proyecto : Tesis: "Análisis de la Composición Química del PM 2.5 en el aire del Campus de la UNALM"
 Procedencia : Universidad Agraria la Molina
 Muestreo Realizado Por : El Cliente
 Cantidad de Muestra : 1
 Producto : Calidad de Aire
 Fecha de Recepción : 2016/08/20
 Fecha de Ensayo : 2016/08/20 al 2016/08/23
 Fecha de Emisión : 2016/08/23

La muestra fue recepcionada en buenas condiciones

I. Resultados

Código de Laboratorio		162245-1		
Código de Cliente		P3.06		
Fecha de Muestreo		11/08/2016		
Hora de Muestreo (h)		00:00		
Tipo de Producto		Filtro		
Tipo Ensayo	Unidad	L.D.M.	Resultados	
Metales (ICP-AES)-PM 2.5 Bajo Volumen				
Ag	Plata	µg/filtro	0,004	<0,004
Al	Aluminio	µg/filtro	0,04	1,78
As	Arsénico	µg/filtro	0,2	<0,2
B	Boro	µg/filtro	1	<1
Ba	Bario	µg/filtro	0,007	0,227
Be	Berilio	µg/filtro	0,007	<0,007
Ca	Calcio	µg/filtro	0,2	12,1
Cd	Cadmio	µg/filtro	0,009	<0,009
Ce	Cerio	µg/filtro	0,01	0,07
Co	Cobalto	µg/filtro	0,02	<0,02
Cr	Cromo	µg/filtro	0,008	0,134
Cu	Cobre	µg/filtro	0,01	0,32
Fe	Hierro	µg/filtro	0,01	6,07
K	Potasio	µg/filtro	0,08	9,82
Li	Litio	µg/filtro	0,006	0,022
Mg	Magnesio	µg/filtro	0,06	3,31
Mn	Manganeso	µg/filtro	0,01	0,38
Mo	Molibdeno	µg/filtro	0,01	0,08
Na	Sodio	µg/filtro	0,3	41,6
Ni	Niquel	µg/filtro	0,01	0,15
P	Fósforo	µg/filtro	0,3	7,2
Pb	Plomo	µg/filtro	0,03	0,30
Sb	Antimonio	µg/filtro	0,1	<0,1
Se	Selenio	µg/filtro	0,2	<0,2
Si	Silicio	µg/filtro	0,1	14,9
Sn	Estaño	µg/filtro	0,05	<0,05
Sr	Estroncio	µg/filtro	0,006	0,046
Ti	Titanio	µg/filtro	0,008	0,127
Tl	Talio	µg/filtro	0,5	<0,5
V	Vanadio	µg/filtro	0,007	0,094
Zn	Zinc	µg/filtro	0,04	4,83

Legenda: L.D.M. = Límite de detección del método, "<"= Menor que el L.D.M. indicado, ">" = Mayor al rango lineal permitido por la técnica analítica, "-"= No Analizado

Calle B Mz C lote 40 Urb. Panamericana - Lima 31 - Perú , Central Telefónica (511) 522-3758 / 523-1828, RPC: 989 114 649

FQ-LAB-206
F.E.: May 16
F.R.: 0

info@envirotest.com.pe / www.envirotest.com.pe

Página 1 de 2

INFORME DE ENSAYO
N° 162365

Nombre del Cliente : CESAR MANUEL LLANOS PUGA
 Dirección : Reservado por el Cliente
 Solicitado Por : Sr. Cesar Manuel Llanos Puga
 Referencia : Cotización N° 1383-16R01
 Proyecto : Tesis: "Análisis de la Composición Química del PM 2.5 en el aire del Campus de la UNALM"
 Procedencia : Universidad Agraria la Molina
 Muestreo Realizado Por : El Cliente
 Cantidad de Muestra : 1
 Producto : Calidad de Aire
 Fecha de Recepción : 2016/09/03
 Fecha de Ensayo : 2016/09/03 al 2016/09/10
 Fecha de Emisión : 2016/09/10

La muestra fue recepcionada en buenas condiciones

I. Resultados

Código de Laboratorio		162365-01		
Código de Cliente		P4.04		
Fecha de Muestreo		21/08/2016		
Hora de Muestreo (h)		00:00		
Tipo de Producto		Filtro		
Tipo Ensayo	Unidad	L.D.M.	Resultados	
Metales (ICP-AES)-PM 2,5 Bajo Volumen				
Ag	Plata	µg/filtro	0,004	<0,004
Al	Aluminio	µg/filtro	0,04	<0,04
As	Arsénico	µg/filtro	0,2	<0,2
B	Boro	µg/filtro	1	<1
Ba	Bario	µg/filtro	0,007	0,230
Be	Berilio	µg/filtro	0,007	<0,007
Ca	Calcio	µg/filtro	0,2	0,4
Cd	Cadmio	µg/filtro	0,009	<0,009
Ce	Cerio	µg/filtro	0,01	0,02
Co	Cobalto	µg/filtro	0,02	<0,02
Cr	Cromo	µg/filtro	0,008	0,061
Cu	Cobre	µg/filtro	0,01	0,20
Fe	Hierro	µg/filtro	0,01	3,47
K	Potasio	µg/filtro	0,08	6,01
Li	Litio	µg/filtro	0,006	<0,006
Mg	Magnesio	µg/filtro	0,06	3,17
Mn	Manganeso	µg/filtro	0,01	<0,01
Mo	Molibdeno	µg/filtro	0,01	0,04
Na	Sodio	µg/filtro	0,3	41,1
Ni	Níquel	µg/filtro	0,01	0,24
P	Fósforo	µg/filtro	0,3	5,4
Pb	Plomo	µg/filtro	0,03	0,34
Sb	Antimonio	µg/filtro	0,1	<0,1
Se	Selenio	µg/filtro	0,2	<0,2
Si	Silicio	µg/filtro	0,1	12,6
Sn	Estaño	µg/filtro	0,05	<0,05
Sr	Estroncio	µg/filtro	0,006	<0,006
Ti	Titanio	µg/filtro	0,008	0,099
Tl	Talio	µg/filtro	0,5	<0,5
V	Vanadio	µg/filtro	0,007	0,328
Zn	Zinc	µg/filtro	0,04	1,17

Legenda: L.D.M. = Límite de detección del método, "<"= Menor que el L.D.M. indicado, ">" = Mayor al rango lineal permitido por la técnica analítica, "--"= No Analizado

INFORME DE ENSAYO N° 162507-A

Nombre del Cliente : CESAR MANUEL LLANOS PUGA
 Dirección : Universidad Agraria la Molina
 Solicitado Por : Sr. Cesar Manuel Llanos Puga
 Referencia : Cotización N° 1383-16R01
 Proyecto : Tesis: "Análisis de la Composición Química del PM 2.5 en el aire del Campus de la UNALM"
 Procedencia : Universidad Agraria la Molina
 Muestreo Realizado Por : El cliente
 Cantidad de Muestra : 1
 Producto : Calidad de Aire
 Fecha de Recepción : 2016/09/17
 Fecha de Ensayo : 2016/09/17 al 2016/09/30
 Fecha de Emisión : 2016/10/01

La muestra fue recepcionada en buenas condiciones

I. Resultados

Código de Laboratorio	162507-01
Código de Cliente	P5.03
Fecha de Muestreo	02/09/2016
Hora de Muestreo (h)	00:00 - 00:00
Tipo de Producto	Filtro Ambiental

Tipo Ensayo	Unidad	L.D.M.	Resultados
Metales (ICP-AES) - PM 2,5 Bajo Volumen			
Ag Plata	µg/filtro	0,004	<0,004
Al Aluminio	µg/filtro	0,04	7,07
As Arsénico	µg/filtro	0,2	<0,2
B Boro	µg/filtro	1	<1
Ba Bario	µg/filtro	0,007	0,348
Be Berilio	µg/filtro	0,007	<0,007
Ca Calcio	µg/filtro	0,2	0,1
Cd Cadmio	µg/filtro	0,009	<0,009
Ce Cerio	µg/filtro	0,01	<0,01
Co Cobalto	µg/filtro	0,02	<0,02
Cr Cromo	µg/filtro	0,008	<0,008
Cu Cobre	µg/filtro	0,01	0,41
Fe Hierro	µg/filtro	0,01	13,82
K Potasio	µg/filtro	0,08	5,26
Li Litio	µg/filtro	0,006	<0,006
Mg Magnesio	µg/filtro	0,06	6,14
Mn Manganeso	µg/filtro	0,01	0,38
Mo Molibdeno	µg/filtro	0,01	0,10
Na Sodio	µg/filtro	0,3	26,5
Ni Niquel	µg/filtro	0,01	<0,01
P Fósforo	µg/filtro	0,3	2,2
Pb Plomo	µg/filtro	0,03	<0,03
Sb Antimonio	µg/filtro	0,1	<0,1
Se Selenio	µg/filtro	0,2	<0,2
Si Silicio	µg/filtro	0,1	19,4
Sn Estaño	µg/filtro	0,05	0,29
Sr Estroncio	µg/filtro	0,006	0,030
Ti Titanio	µg/filtro	0,008	0,403
Tl Talio	µg/filtro	0,5	<0,5
V Vanadio	µg/filtro	0,007	0,052
Zn Zinc	µg/filtro	0,04	2,31

Legenda: L.D.M. = Límite de detección del método. *<=" Menor que el L.D.M. indicado. *>=" Mayor al rango lineal permitido por la técnica analítica. *--=" No Analizado
 *<=" Menor que el L.D.M. indicado. *>=" Mayor al rango lineal permitido por la técnica analítica.

INFORME DE ENSAYO N° 162507-B

Nombre del Cliente : **CESAR MANUEL LLANOS PUGA**
 Dirección : Universidad Agraria la Molina
 Solicitado Por : Sr. Cesar Manuel Llanos Puga
 Referencia : Cotización N° 1383-16R01
 Proyecto : Tesis: "Análisis de la Composición Química del PM 2.5 en el aire del Campus de la UNALM"
 Procedencia : Universidad Agraria la Molina
 Muestreo Realizado Por : El cliente
 Cantidad de Muestra : 1
 Producto : Calidad de Aire
 Fecha de Recepción : 2016/09/17
 Fecha de Ensayo : 2016/09/17 al 2016/09/30
 Fecha de Emisión : 2016/10/01

La muestra fue recepcionada en buenas condiciones

I. Resultados

Código de Laboratorio	162507-01
Código de Cliente	P0
Fecha de Muestreo	17/09/2016
Hora de Muestreo (h)	00:00 - 00:00
Tipo de Producto	Filtro Ambiental

Tipo Ensayo	Unidad	L.D.M.	
Metales (ICP-AES) - PM 2.5 Bajo Volumen			
Ag Plata	µg/filtro	0,004	<0,004
Al Aluminio	µg/filtro	0,04	<0,04
As Arsénico	µg/filtro	0,2	<0,2
B Boro	µg/filtro	1	<1
Ba Bario	µg/filtro	0,007	0,128
Be Berilio	µg/filtro	0,007	<0,007
Ca Calcio	µg/filtro	0,2	<0,2
Cd Cadmio	µg/filtro	0,009	<0,009
Ce Cerio	µg/filtro	0,01	<0,01
Co Cobalto	µg/filtro	0,02	<0,02
Cr Cromo	µg/filtro	0,008	<0,008
Cu Cobre	µg/filtro	0,01	0,06
Fe Hierro	µg/filtro	0,01	1,47
K Potasio	µg/filtro	0,08	<0,08
Li Litio	µg/filtro	0,006	<0,006
Mg Magnesio	µg/filtro	0,06	0,87
Mn Manganeso	µg/filtro	0,01	<0,01
Mo Molibdeno	µg/filtro	0,01	<0,01
Na Sodio	µg/filtro	0,3	3,5
Ni Niquel	µg/filtro	0,01	<0,01
P Fósforo	µg/filtro	0,3	<0,3
Pb Plomo	µg/filtro	0,03	<0,03
Sb Antimonio	µg/filtro	0,1	<0,1
Se Selenio	µg/filtro	0,2	<0,2
Si Silicio	µg/filtro	0,1	3,1
Sn Estaño	µg/filtro	0,05	<0,05
Sr Estroncio	µg/filtro	0,006	<0,006
Ti Titanio	µg/filtro	0,008	<0,008
Tl Talio	µg/filtro	0,5	<0,5
V Vanadio	µg/filtro	0,007	<0,007
Zn Zinc	µg/filtro	0,04	0,60

Leyenda: L.D.M. = Límite de detección del método, "<"= Menor que el L.D.M. indicado, ">" = Mayor al rango lineal permitido por la técnica analítica, "-"= No Analizado
 "<="= Menor que el L.D.M. indicado, ">" = Mayor al rango lineal permitido por la técnica analítica.

Anexo 3. Cálculos para la determinación de la concentración de metales en el PM_{2.5} en el punto P1

Filtro		P1.03			
Volumen de aire muestreado estandarizado (m ³)		24.08			
Metales		Medición ug/filtro	Blanco ug/filtro	Medición ajustada ug/filtro	Concentración ug/m ³
Plata	Ag	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Aluminio	Al	2.3	N.D.	2.3	0.0955
Arsénico	As	0.86	N.D.	0.86	0.0357
Boro	B	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Bario	Ba	0.309	0.128	0.181	0.0075
Berilio	Be	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Calcio	Ca	18	N.D.	18	0.7474
Cadmio	Cd	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Cerio	Ce	0.42	N.D.	0.42	0.0174
Cobalto	Co	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Cromo	Cr	0.109	N.D.	0.109	0.0045
Cobre	Cu	0.39	0.06	0.33	0.0137
Hierro	Fe	3.59	1.47	2.12	0.0880
Potasio	K	7.68	N.D.	7.68	0.3189
Litio	Li	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Magnesio	Mg	3.05	0.87	2.18	0.0905
Manganeso	Mn	0.22	N.D.	0.22	0.0091
Molibdeno	Mo	0.06	N.D.	0.06	0.0025
Sodio	Na	59.9	3.5	56.4	2.3419
Níquel	Ni	0.1	N.D.	0.1	0.0042
Fósforo	P	7.3	N.D.	7.3	0.3031
Plomo	Pb	0.36	N.D.	0.36	0.0149
Antimonio	Sb	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Selenio	Se	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Silicio	Si	25.3	3.1	22.2	0.9218
Estaño	Sn	0.18	N.D.	0.18	0.0075
Estroncio	Sr	0.076	N.D.	0.076	0.0032
Titanio	Ti	0.058	N.D.	0.058	0.0024
Talio	Tl	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Vanadio	V	0.049	N.D.	0.049	0.0020
Zinc	Zn	2.29	0.6	1.69	0.0702

Anexo 4. Cálculos para la determinación de la concentración de metales en el PM_{2.5} en el punto P2

Filtro		P2.07			
Volumen de aire muestreado estandarizado (m ³)		24.04			
Metales		Medición ug/filtro	Blanco ug/filtro	Medición ajustada ug/filtro	Concentración ug/m ³
Plata	Ag	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Aluminio	Al	3.73	N.D.	3.73	0.1552
Arsénico	As	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Boro	B	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Bario	Ba	0.186	0.128	0.058	0.0024
Berilio	Be	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Calcio	Ca	21.3	N.D.	21.3	0.8860
Cadmio	Cd	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Cerio	Ce	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Cobalto	Co	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Cromo	Cr	0.12	N.D.	0.12	0.0050
Cobre	Cu	0.3	0.06	0.24	0.0100
Hierro	Fe	4.92	1.47	3.45	0.1435
Potasio	K	11.6	N.D.	11.6	0.4825
Litio	Li	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Magnesio	Mg	4.66	0.87	3.79	0.1577
Manganeso	Mn	0.17	N.D.	0.17	0.0071
Molibdeno	Mo	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Sodio	Na	52.6	3.5	49.1	2.0424
Níquel	Ni	0.07	N.D.	0.07	0.0029
Fósforo	P	4.7	N.D.	4.7	0.1955
Plomo	Pb	0.34	N.D.	0.34	0.0141
Antimonio	Sb	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Selenio	Se	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Silicio	Si	17	3.1	13.9	0.5782
Estaño	Sn	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Estroncio	Sr	0.083	N.D.	0.083	0.0035
Titanio	Ti	0.126	N.D.	0.126	0.0052
Talio	Tl	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Vanadio	V	0.041	N.D.	0.041	0.0017
Zinc	Zn	1.05	0.6	0.45	0.0187

Anexo 5. Cálculos para la determinación de la concentración de metales en el PM_{2.5} en el punto P3

Filtro		P3.06			
Volumen de aire muestreado estandarizado (m ³)		24.12			
Metales		Medición ug/filtro	Blanco ug/filtro	Medición ajustada ug/filtro	Concentración ug/m ³
Plata	Ag	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Aluminio	Al	1.78	N.D.	1.78	0.0738
Arsénico	As	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Boro	B	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Bario	Ba	0.227	0.128	0.099	0.0041
Berilio	Be	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Calcio	Ca	12.1	N.D.	12.1	0.5017
Cadmio	Cd	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Cerio	Ce	0.07	N.D.	0.07	N.D.
Cobalto	Co	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Cromo	Cr	0.134	N.D.	0.134	0.0056
Cobre	Cu	0.32	0.06	0.26	0.0108
Hierro	Fe	6.07	1.47	4.6	0.1907
Potasio	K	9.82	N.D.	9.82	0.4071
Litio	Li	0.022	N.D.	0.022	N.D.
Magnesio	Mg	3.31	0.87	2.44	0.1012
Manganeso	Mn	0.38	N.D.	0.38	0.0158
Molibdeno	Mo	0.08	N.D.	0.08	N.D.
Sodio	Na	41.6	3.5	38.1	1.5796
Níquel	Ni	0.15	N.D.	0.15	0.0062
Fósforo	P	7.2	N.D.	7.2	0.2985
Plomo	Pb	0.3	N.D.	0.3	0.0124
Antimonio	Sb	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Selenio	Se	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Silicio	Si	14.9	3.1	11.8	0.4892
Estaño	Sn	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Estroncio	Sr	0.046	N.D.	0.046	0.0019
Titanio	Ti	0.127	N.D.	0.127	0.0053
Talio	Tl	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Vanadio	V	0.094	N.D.	0.094	0.0039
Zinc	Zn	4.83	0.6	4.23	0.1754

Anexo 6. Cálculos para la determinación de la concentración de metales en el PM_{2.5} en el punto P4

Filtro		P4.04			
Volumen de aire muestreado estandarizado (m ³)		24.00			
Metales		Medición ug/filtro	Blanco ug/filtro	Medición ajustada ug/filtro	Concentración ug/m ³
Plata	Ag	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Aluminio	Al	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Arsénico	As	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Boro	B	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Bario	Ba	0.23	0.128	0.102	0.0043
Berilio	Be	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Calcio	Ca	0.4	N.D.	0.4	0.0167
Cadmio	Cd	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Cerio	Ce	0.02	N.D.	0.02	0.0008
Cobalto	Co	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Cromo	Cr	0.061	N.D.	0.061	0.0025
Cobre	Cu	0.2	0.06	0.14	0.0058
Hierro	Fe	3.47	1.47	2	0.0833
Potasio	K	6.01	N.D.	6.01	0.2504
Litio	Li	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Magnesio	Mg	3.17	0.87	2.3	0.0958
Manganeso	Mn	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Molibdeno	Mo	0.04	N.D.	0.04	0.0017
Sodio	Na	41.1	3.5	37.6	1.5667
Níquel	Ni	0.24	N.D.	0.24	0.0100
Fósforo	P	5.4	N.D.	5.4	0.2250
Plomo	Pb	0.34	N.D.	0.34	0.0142
Antimonio	Sb	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Selenio	Se	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Silicio	Si	12.6	3.1	9.5	0.3958
Estaño	Sn	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Estroncio	Sr	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Titanio	Ti	0.099	N.D.	0.099	0.0041
Talio	Tl	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Vanadio	V	0.328	N.D.	0.328	0.0137
Zinc	Zn	1.17	0.6	0.57	0.0238

Anexo 7. Cálculos para la determinación de la concentración de metales en el PM_{2.5} en el punto P5

Filtro		P5.03			
Volumen de aire muestreado estandarizado (m ³)		24.08			
Metales		Medición ug/filtro	Blanco ug/filtro	Medición ajustada ug/filtro	Concentración ug/m ³
Plata	Ag	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Aluminio	Al	7.07	N.D.	7.07	0.2936
Arsénico	As	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Boro	B	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Bario	Ba	0.348	0.128	0.22	0.0091
Berilio	Be	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Calcio	Ca	0.1	N.D.	0.1	0.0042
Cadmio	Cd	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Cerio	Ce	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Cobalto	Co	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Cromo	Cr	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Cobre	Cu	0.41	0.06	0.35	0.0145
Hierro	Fe	13.82	1.47	12.35	0.5128
Potasio	K	5.26	N.D.	5.26	0.2184
Litio	Li	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Magnesio	Mg	6.14	0.87	5.27	0.2188
Manganeso	Mn	0.38	N.D.	0.38	0.0158
Molibdeno	Mo	0.1	N.D.	0.1	0.0042
Sodio	Na	26.5	3.5	23	0.9550
Níquel	Ni	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Fósforo	P	2.2	N.D.	2.2	0.0914
Plomo	Pb	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Antimonio	Sb	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Selenio	Se	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Silicio	Si	19.4	3.1	16.3	0.6768
Estaño	Sn	0.29	N.D.	0.29	0.0120
Estroncio	Sr	0.03	N.D.	0.03	0.0012
Titanio	Ti	0.403	N.D.	0.403	0.0167
Talio	Tl	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Vanadio	V	0.052	N.D.	0.052	0.0022
Zinc	Zn	2.31	0.6	1.71	0.0710

Anexo 8. Cálculos para la determinación de la concentración de nitratos en el PM_{2.5}

Muestra	Volumen de aire muestreado estandarizado (m ³)	Concentración (ppm)	Blanco (ppm)	Concentración corregida (ppm)	Solución analizada (mL)	Concentración de nitrato (ug/m ³)
P1.01	24.43	12.682		11.803		4.83
P1.06	24.09	13.976		13.097		5.44
P2.01	24.06	9.266		8.387		3.49
P2.06	24.04	11.565		10.686		4.45
P3.01	24.04	10.262	0.879	9.383	10	3.90
P3.04	24.15	8.297		7.418		3.07
P4.01	24.11	6.578		5.699		2.36
P4.06	24.09	6.787		5.908		2.45
P5.02	24.02	6.837		5.958		2.48
P5.07	24.05	9.042		8.163		3.39

Anexo 9. Cálculos para la determinación de la concentración de sulfatos en el PM_{2.5}

Muestra	Volumen de aire muestreado estandarizado (m ³)	Concentración (ppm)	Blanco (ppm)	Concentración corregida (ppm)	Solución analizada (mL)	Concentración de sulfato (ug/m ³)
P1.01	24.43	36.955		28.062		11.49
P1.06	24.09	23.670		14.776		6.13
P2.01	24.06	28.230		19.337		8.04
P2.06	24.04	21.305		12.412		5.16
P3.01	24.04	38.436	8.8933	29.542	10	12.29
P3.04	24.15	28.232		19.338		8.01
P4.01	24.11	12.733		3.840		1.59
P4.06	24.09	27.219		18.325		7.61
P5.02	24.02	28.027		19.134		7.96
P5.07	24.05	26.606		17.712		7.36

Anexo 10. Datos meteorológicos de la Estación Meteorológica Alexander Von Humboldt correspondientes al periodo 04-Jul a 10-Set del 2016

Fecha	Precipitación (mm)	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)	Velocidad del viento (m/s)	Dirección del viento (°)	Radiación solar (Ly/día)
04/07/2016	0	17	81	2.4	253	212.2
05/07/2016	0.2	17	87	1.7	237	114.6
06/07/2016	0.1	16	87	1.4	241	92.1
07/07/2016	0	16	83	1.7	253	166.1
08/07/2016	0	16	87	1.8	224	70.6
09/07/2016	0.9	16	85	1.4	233	100.4
10/07/2016	0.2	17	83	1.6	226	106.1
11/07/2016	0	17	82	2.4	211	160.6
12/07/2016	0.3	17	84	1.6	220	86.7
13/07/2016	0	17	81	1.9	278	194.0
14/07/2016	0	16	85	1.9	247	67.5
15/07/2016	0	16	86	2.0	220	79.8
16/07/2016	0	16	85	2.3	226	131.2
17/07/2016	0	16	83	2.6	226	209.3
18/07/2016	0	16	86	2.5	212	85.9
19/07/2016	0.8	16	86	1.8	243	160.1
20/07/2016	0.1	16	83	3.0	247	198.5
21/07/2016	0	16	86	2.2	244	122.8
22/07/2016	0	16	85	2.2	249	205.9
23/07/2016						167.9
24/07/2016	0	17	79	2.9	48	183.4
25/07/2016	0	16	82	3.3	250	256.4
26/07/2016	0	16	83	3.2	218	157.1
27/07/2016	0	17	77	2.9	230	281.8
28/07/2016	0	16	80	2.4	51	237.0
29/07/2016	0	16	77	2.7	239	288.7
30/07/2016	0	16	78	2.3	238	325.2
31/07/2016	0	16	79	2.2	267	333.0
01/08/2016	0	16	82	2.4	257	270.2
02/08/2016	0	16	84	1.9	263	102.8
03/08/2016	0	16	80	2.5	250	183.1
04/08/2016	0	15	82	1.8	249	112.0
05/08/2016	0	16	81	1.7	70	172.5
06/08/2016	0	16	80	3.1	89	158.7

Fecha	Precipitación (mm)	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)	Velocidad del viento (m/s)	Dirección del viento (°)	Radiación solar (Ly/día)
07/08/2016	0	15	84	1.9	300	75.2
08/08/2016	0	16	83	2.0	224	138.8
09/08/2016	0.2	16	83	2.0	250	235.7
10/08/2016	0	15	84	1.6	213	208.1
11/08/2016	0	16	86	2.1	256	180.6
12/08/2016	0.3	16	86	2.6	224	164.6
13/08/2016	0	16	81	2.5	219	242.5
14/08/2016	0.3	16	82	2.5	228	290.4
15/08/2016	0.7	15	87	2.4	233	79.8
16/08/2016	0	16	86	2.1	230	138.9
17/08/2016	0	17	80	2.7	257	304.6
18/08/2016	0.2	16	82	2.6	243	262.1
19/08/2016	0	15	86	2.3	241	93.7
20/08/2016	0.6	15	89	1.6	237	63.0
21/08/2016	0.1	16	82	1.7	245	269.9
22/08/2016	0	17	81	2.2	261	
23/08/2016	0	16	84	2.3	243	248.9
24/08/2016	0	16	84	2.4	254	186.7
25/08/2016	0	17	81	2.3	7	327.5
26/08/2016	0.3	16	85	2.5	243	164.1
27/08/2016	0	16	86	3.0	238	170.4
28/08/2016	0.7	17	80	2.2	229	303.2
29/08/2016	0	17	81	3.0	228	268.4
30/08/2016	0.9	15	87	2.2	266	66.0
31/08/2016	0.5	16	88	1.7	227	95.2
01/09/2016	0.3	16	86	2.3	234	119.7
02/09/2016	0.1	16	85	2.1	63	266.1
03/09/2016	0.2	16	84	2.6	235	277.3
04/09/2016	0	16	86	2.7	256	150.4
05/09/2016	0	16	84	2.7	210	207.9
06/09/2016	0.1	16	84	3.1	246	283.5
07/09/2016	0	17	78	3.3	80	340.9
08/09/2016	0	16	80	3.3	218	265.2
09/09/2016	0	16	78	2.9	240	312.2
10/09/2016	0	17	74	3.2	248	365.7

Anexo 11. 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



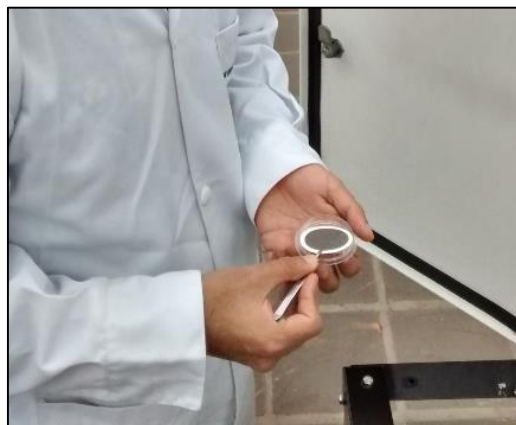
Fotografía 4: Muestreo de $PM_{2.5}$ en el punto P4



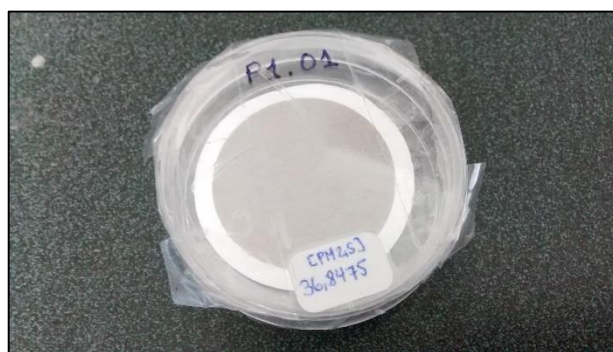
Fotografía 5: Muestreo de $PM_{2.5}$ en el punto P5



Fotografía 6: Manipulación de filtros con pinza



Fotografía 7: Filtro colectado



Fotografía 8: Desecador conteniendo filtros



Fotografía 9: Filtro en balanza analítica



Fotografía 10: Filtros preservados a 4 °C



Fotografía 11: Filtros en baño ultrasónico



Fotografía 12: Procedimiento para la extracción de aniones



Fotografía 13: Campos de cultivo en la zona



Fotografía 14: Estación de servicio (grifo) cercana al punto P4



Fotografía 15: Combustible que proporciona el grifo

