

Caracterización química - morfológica del PM_{2,5} en Lima metropolitana mediante microscopía electrónica de barrido (MEB)

Characterization of the PM_{2,5} chemical - morphological in Lima metropolitan with scanning electronic microscopy (SEM)

Carol Ordóñez - Aquino¹ & Odón Sánchez - Ccoyllo²

¹Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú – SENAMHI

² Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur- UNTELS

ordonez.carol26@gmail.com

Resumen: La cuantificación de las concentraciones de los contaminantes criterio ha comprobado que el problema en la ciudad de Lima radica en las altas concentraciones de material particulado, siendo de mayor interés el material particulado menor de 2,5 micrómetros (PM_{2,5}). Con la finalidad de identificar los elementos químicos del PM_{2,5}, se realizaron dos campañas de muestreo del 13 de abril al 03 de mayo del 2015, se muestreó en Ate y Villa María del Triunfo. Y del 18 de mayo al 07 de junio del 2015 en Puente Piedra y San Juan de Lurigancho, con el equipo Muestreador de bajo volumen, marca Thermo Scientific, modelo Partisol. La caracterización química -morfológica del material particulado se realizó con un microscopio electrónico de barrido de la marca SEMFE QUANTA 200 con un espectrofotómetro EDS acoplado. Los resultados indicaron la presencia de elementos químicos tales como silicio, titanio, aluminio, zinc, cobre, cloruros de sodio, sulfatos, etc. que están asociados a tipos de fuentes antropogénicas y de fuentes naturales que caracteriza a cada lugar muestreado.

Palabras clave: PM_{2,5}, muestreo, microscopía electrónica de barrido, fuentes contaminantes

Abstract: The quantification of the concentrations of the pollutant criteria has shown that the problem in the city of Lima is the high concentrations of particulate matter, is more interest PM_{2,5}. With the finality to identify the chemicals elements of PM_{2,5}, we made two sampling campaigns at April 13 to May 3, 2015 in Ate and Villa María del Triunfo, in May 18 to June 7, 2015 in Puente Piedra and San Juan de Lurigancho, with the equipment Low sampler Thermo Scientific, model Partisol. The chemical-morphological characterization of the particulate material was performed with a scanning electron microscope of the SEMFE QUANTA 200 with ED's spectrophotometer. The results indicated the presence of chemical elements such as silicon, titanium, aluminium, zinc, copper, sodium chlorides, sulphates, etc. Which are associated with types of anthropogenic sources and natural sources that characterize each site sampled.

Key words: PM_{2,5}, Sampling, scanning electron microscopy, pollution sources

1 Introducción

Las fuentes de contaminación pueden ser de origen natural o antropogénicas, estas últimas se clasifican generalmente como fuentes móviles, atribuidas a las emisiones del parque automotor, a las fuentes fijas, referidas a las emisiones de las actividades industriales, y las fuentes de área que son aportes de ambos pero en escalas menores (Godish, 2004), éstas generan diferentes contaminantes del aire como el dióxido de azufre, dióxido de nitrógeno, monóxido de carbono, etc.; y el material particulado, este último es el más estudiado dado su capacidad para afectar la salud humana (Carbajal-Arroyo *et al.*, 2011; Reyna et al., 2012)

En la atmósfera se encuentran diferentes tipos de partículas suspendidas en forma sólida o líquida, que se suspende en el aire de acuerdo al tamaño. Típicamente se clasifica en tres tamaños, las partículas ultra finas con diámetros de 0.01- 0.1 μm , que son producto de la condensación de gases sobresaturados como el SO₂, NH₃ y NO_x, partículas finas de 0.1- 2.5 μm , compuestas generalmente por nitratos de amonio, sulfatos y carbono orgánico secundario y las partículas gruesas de diámetro mayor a 2.5 μm , como las partículas de suelo, restos vegetales y el material producido por las actividades de construcción (Jorquera, 2010).

Como se sabe el tamaño de las partículas representa un grave riesgo a la salud de las personas, mientras menor sea el diámetro de estas partículas, mayor será el potencial daño en la salud como es el caso de PM_{2.5}, que ingresa fácilmente a los pulmones y alveolos. Tan grave es la situación que la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC) recientemente anunció que la contaminación del aire es carcinógena para los humanos en un periodo de exposición de mediano a largo plazo. Sin embargo, no solo el tamaño es lo que representa un grave riesgo, sino la composición química del mismo, ya que se encuentra íntimamente relacionado con el tipo de fuente que la genera. A continuación se presenta un resumen de los principales componentes químicos de las partículas asociados a su fuente de origen (Tabla 1).

Tabla 1. Principales componentes químicos de las partículas asociados a su fuente de origen

	Emissiones marinas	Emissiones de polvo de suelo	Emissiones volcánicas	Quema de biomasa	Combustión de combustible fósil para el transporte y energía	Combustión de combustible fósil y la combustión de metal para procesos industriales
Carbón negro (C)			X	x	x	x
Materia orgánica (C,H, O, N)	x	X	X	x	x	x
Amonio (NH ₄ ⁺)				x	x	x
Sodio (Na ⁺)	x	X	X	x		x
Calcio (Ca ²⁺)	x	X	X	x		x
Magnesio (Mg ²⁺)	x	X	X	x		x
Potasio (K ⁺)	x	X	X	x		x
Sulfato (SO ₄ ²⁻)	x	X	X	x	x	x
Nitrato (NO ₃ ⁻)				x		x
Cloruro (Cl ⁻)	x	X	x	x		x
Silicio (Si)		X	x		x	x
Aluminio (Al)		X	x		x	x
Hierro (Fe)		X	x	x	x	x

Fuente: Jacobson, 2002

Entre las técnicas para caracterizar las partículas y conocer su composición química se ha destacado la técnica de microscopía, que tiene dos generaciones, la primera corresponde a la microscopía óptica y la segunda a la microscopía electrónica. La microscopía electrónica de barrido (MEB), además de determinar la composición química también provee información valiosa sobre las características morfológicas de las partículas, se basa en el uso de un haz de electrones que incide sobre una muestra, que al hacer contacto emite diferentes señales que son: electrones secundarios, electrones retro-dispersados, ambas proporcionan la imagen de la muestra. Esta técnica se realiza conjuntamente con un análisis químico por espectrometría dispersiva de rayos X (EDS).

2 Planteamiento del problema

Lima Metropolitana alberga el 29 % de la población nacional y en ella se centralizan las más importantes actividades económicas del país. En los últimos años la cuantificación de las concentraciones de los contaminantes criterio ha proporcionado información vital del estado y tendencias de la calidad del aire, comprobando que el problema en la ciudad radica en las altas concentraciones de material particulado. Cada año se incrementa el número de días que se supera el Estándar Nacional de Calidad para el Aire diario del PM_{2.5} de 25 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, por ejemplo en el 2014 en Puente Piedra se superó el ECA durante 225 días y al año siguiente fueron 235 días. Alcanzando máximas diarias de hasta 65 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ como sucedió en el distrito de Ate (Sánchez – Ccoyllo et al, 2015).

En la actualidad no se cuenta con inventarios de fuentes móviles y fijas actualizados, el último data del 2005, por lo que no se tiene precisiones de los aportes de cada fuente contaminante, por lo que la presente investigación representa una herramienta útil para identificar las fuentes y pueden ser usados para derivar estrategias de control de la contaminación del aire.

3 Objetivo

Caracterizar química y morfológicamente el PM_{2.5} de Lima Metropolitana mediante la Microscopía electrónica de barrido

4 Sustento teórico

La costa central del Perú donde se encuentra la ciudad de Lima se encuentra influenciada por la presencia del Anticiclón del Pacífico Sur que debido al núcleo alta presión produce condiciones estables en la troposfera baja (Saavedra, Calvo y Jiménez., 2011) generando que la Corriente de Humboldt, de aguas frías recorra las costas y genere neblinas (Errazuriz, 1998), por ello siempre se observa a Lima con

nubes estratos bajos, una capa de inversión que varía de acuerdo a la época estacional, en verano se encuentra aproximadamente entre los 500 m en verano y 800 metros en invierno, lo cual influencia en la dispersión vertical de los contaminantes.

En base a los flujos de vientos, la configuración topográfica de la ciudad y tomando como criterio el crecimiento poblacional de la ciudad abarcando desde la costa hasta los 100 m.s.n.m se delimitó la Cuenca Atmosférica de Lima – Callao, caracterizándose por los vientos dominantes hacia el norte y este de la ciudad (SENAMHI, 2010), lo cual concuerda con los datos registrados de las estaciones de monitoreo ubicadas en dichos lugares, por ello los distritos que generalmente superan los Estándares Nacionales de Calidad del Aire son: Puente Piedra (ubicado en la zona norte), Ate y San Juan de Lurigancho (ubicados en la zona este) y Villa María del Triunfo (ubicado en zona sur de Lima), especialmente superan el material particulado PM_{10} y $PM_{2.5}$.

De ambos contaminantes el que mayor preocupación representa para la salud humana es el $PM_{2.5}$, debido a su menor tamaño puede ingresar fácilmente por las vías respiratorias incluso llegar a los alveolos pulmonares y posteriormente al torrente sanguíneo, ocasionando enfermedades respiratorias y cardiovasculares, poniendo en riesgo a la población más vulnerable: los niños, ancianos y mujeres embarazadas.

5 Metodología

a) Puntos de muestreo

Se seleccionaron cuatro distritos de Lima Metropolitana que en los últimos años presentaron altas concentraciones de material particulado: Ate, Villa María del Triunfo, Puente Piedra y San Juan de Lurigancho.

El distrito de Ate se encuentra ubicado en la zona este de Lima Metropolitana. Tiene una superficie de 77.92 km², a una altitud de 500 m.s.n.m. Tiene una población de 630 085 habitantes. Por encontrarse al este de la ciudad, se encuentra rodeado de cerros agrestes y áridos, por lo que el tipo de suelo mayormente es rocoso y de arena de gran espesor (INDECI, 2010) y solo cuenta con 2.9 m².hab⁻¹ de áreas verdes (MML, 2013), cuando la Organización Mundial de la Salud recomienda como mínimo 10 m². Hab-1. El punto de muestreo se ubicó en la Plaza de armas del distrito a unos 100 metros de la Carretera central, la vía más importante para el desplazamiento de transporte pesado para la región central del país.

El distrito de Villa María del Triunfo se encuentra ubicado en la Zona sur de Lima Metropolitana. Tiene una superficie de 70.57 km², a una altitud de 1000

m.s.n.m. y cuenta con una población de 448 545 habitantes. Posee un tipo de suelo rocoso y granular fino y arcilloso (INDECI, 2010). Cuenta con 3.7 m².hab⁻¹, de áreas verdes (MML, 2013). El punto de muestreo se ubicó en el Parque Virgen de Lourdes a 3.26 km de una planta cementera.

El distrito de Puente Piedra se encuentra ubicado en la zona norte de Lima Metropolitana. Tiene una superficie de 0.07 km², a una altitud de 183.40 m.s.n.m y cuenta con 353 489 habitantes, el tipo de suelo es rocoso y arena de gran espesor (INDECI, 2010). Cuenta con 1.3 m².hab⁻¹, de áreas verdes (MML, 2013). El punto de muestreo se ubicó en el Complejo deportivo municipal El gallo de oro, a 0.18 Km de la Panamericana Norte, importante vía por donde se desplaza vehículos livianos y pesados para el norte del país.

El distrito de San Juan de Lurigancho se encuentra ubicado en la zona este de Lima Metropolitana. Tiene una superficie de 131.2 km², a una altitud de 2200 m.s.n.m. y cuenta con una población de 1 91 303 habitantes (INEI, 2015), tiene un relieve uniforme que ha permitido que sea el distrito más populosos de Lima (MSJL, 2015) y posee 1.9 m².hab⁻¹ de áreas verdes (IMP, 2013). El punto de muestreo se ubicó en la Universidad Cesar Vallejo, a 0.55 Km de la vía del Tren eléctrico.



Figura 1: Puntos de muestreo. Primera campaña: Ate y Villa María del Triunfo (en círculos rojos) y segunda campaña: Puente Piedra y San Juan de Miraflores (en círculos negros)

b) Campañas de muestreo

Se realizaron dos campañas de muestreo, del 13 de abril al 03 de mayo del 2015 se muestreó en Ate y Villa María del Triunfo. Y del 18 de mayo al 07 de junio del 2015 en Puente Piedra y San Juan de Lurigancho. El periodo de muestreo fue continuo (de lunes a viernes, fines de semana y feriado), con una frecuencia diaria en tres horarios: mañana de 8:00 a 13:30 horas, tarde de 14:00 a 19:30 horas y noche de 20:00 a 07:30 horas.

Se utilizó el equipo de calidad del aire denominado Muestreador de bajo volumen con cabezal para $PM_{2.5}$, marca Thermo Scientific, modelo Partisol. El equipo poseía un cabezal de $2.5 \mu m$ y una bomba que aspiraba el aire del ambiente a volumen constante ($16.7 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$), donde se utilizaron filtros de teflón, de 46.2 mm y de porosidad de $2 \mu m$, marca Whatman.

La caracterización química - morfológica del material particulado se realizó con un microscopio electrónico de barrido de la marca Semfe Quanta 200 con un espectrofotómetro EDS acoplado. El sistema emite un haz de electrones a través del calentamiento de un filamento de tungsteno, que en una cámara de vacío bombardea a las muestras, emitiendo señales que son captadas por el detector de electrones secundarios y el detector de electrones retro dispersados.



Figura 2: Muestreador de bajo volumen (izquierda). Muestras de filtros que indican el color inicial antes y después del periodo de muestreo en Ate (superior izquierda), Villa María del Triunfo (superior derecha), Puente Piedra (inferior izquierda) y San Juan de Lurigancho (inferior derecha) Análisis por microscopía electrónica de barrido (MEB)

Los filtros de PM_{2.5} fueron adheridos con una cinta de carbón a la platina y las imágenes fueron tomadas en modo de bajo vacío, con voltaje de 30 kv, con una distancia focal de 10 mm con magnificaciones de 100x hasta 6000x, dependiendo de la captura de mejor imagen de la partícula. Los resultados se obtuvieron en porcentaje en peso de cada elemento químico identificado, siendo posible visualizarlo adicionalmente con un espectrograma. Adicionalmente se tomaron microfotografías de solo aquellas partículas resaltantes por su forma y tamaño. Los elementos químicos comunes de mayor proporción se agruparon para determinar su distribución porcentual, lo cual permitió la caracterización química del PM_{2.5}.

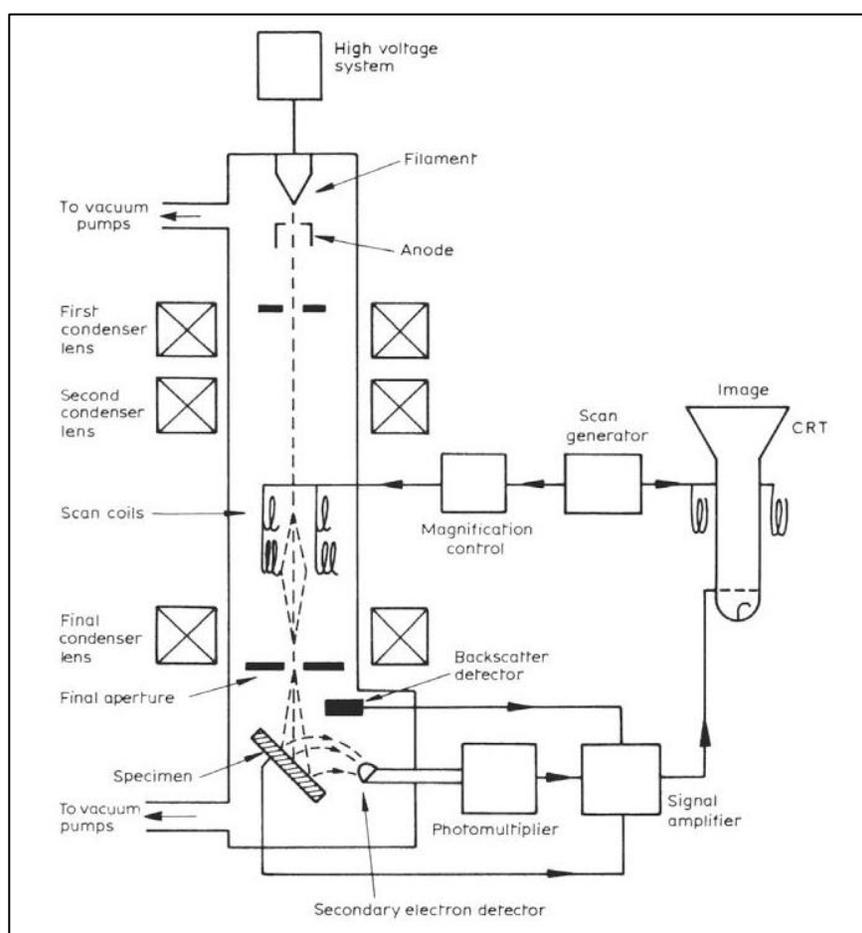


Figura 3: Esquema de un microscopio electrónico de barrido (Sawyer, L y Grubb, D., 1987)



Figura 4: Microscopio electrónico de barrido Semfe Quanta 200 con un espectrofotómetro EDS acoplado

6 Resultados

6.1 Análisis químico total

El $PM_{2.5}$ en promedio se encontraba químicamente constituido por 5.6% de azufre (S), 3.7% de cloro (Cl), 2.9% de sodio (Na), 2.4% de silicio (Si), 2.3% de hierro (Fe), 1.3% de calcio (Ca), 0.9% de aluminio (Al) y 0.8% de potasio (K) (Figura 5), el resto de elementos se agruparon ya que representaban menores proporciones, tales como el: titanio (Ti), zinc (Zn), magnesio (Mg), manganeso (Mn), fósforo (P), carbón (C) y cobalto (Co), cobre (Cu), plomo (Pb), bario (Ba). Por otro lado, a las partículas resaltantes se las analizó químicamente, por lo que se distinguieron cinco categorías, en base al elemento químico predominante: a) partículas de silicio, b) partículas de azufre, c) cloruros, d) metales; asimismo se halló material biológico (partes de plantas, insectos, esporas, etc.), e) elementos biológicos; adicionalmente se tomaron microfotografías partículas para caracterizar su forma y tamaño.

a) Partículas de silicio

Se identificaron partículas que contenían silicio (Si), hierro (Fe), aluminio (Al) y magnesio (Mg), denominadas como silicatos ferro magnesianos, también se hallaron feldespatos potásicos, ortoclasas, biotitas y cuarzos, los cuales se encuentran generalmente asociados a los minerales de las rocas y/o re suspensión de suelo (Mamane et al, 2001; Paoletti et al., 2003; Satsangi y Yadav, 2014). Las formas son diversas y con diferentes texturas.

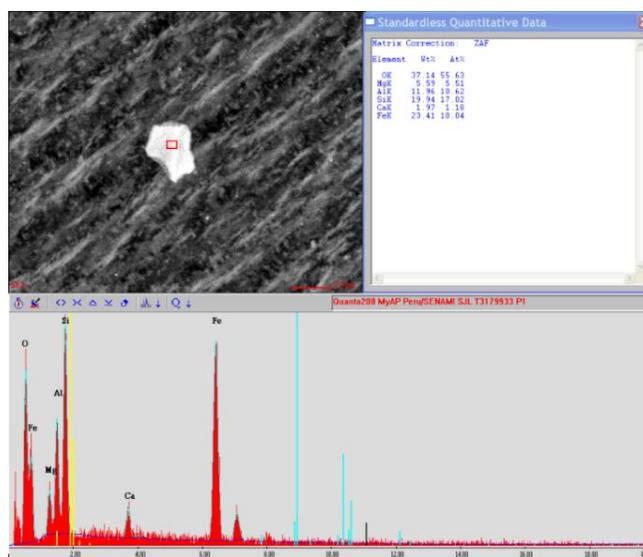


Figura 5: Silicato ferro magnesiano

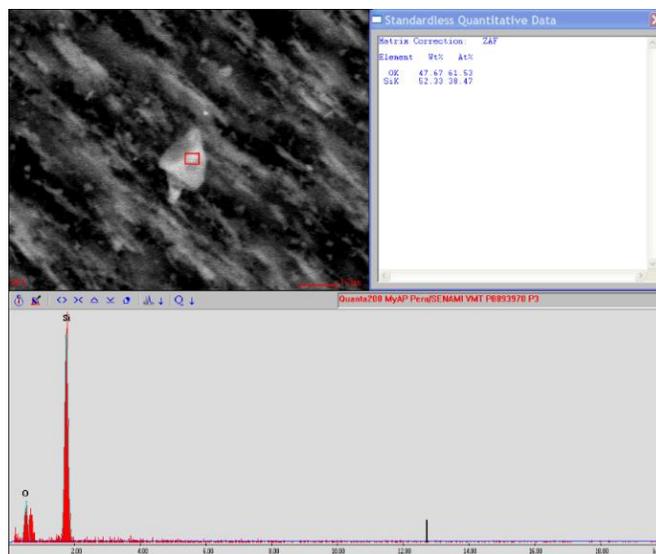


Figura 6: Cuarzo

b) Partículas de azufre

En este grupo de partículas se identificaron los sulfatos de calcio, comúnmente conocido como yeso, sulfato de bario, denominado también como baritina, además de sulfuro de cadmio y de hierro. La presencia de sulfatos indica la oxidación del

dióxido de azufre presente en la atmósfera (Harrison y Yin, 2000). Las reacciones secundarias de gas a partículas, están propiciando generación de aerosol secundario.

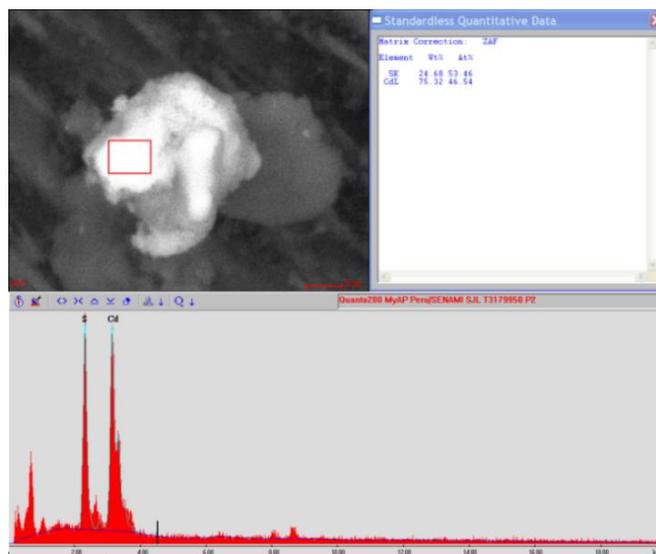


Figura 7: Sulfuro de cadmio

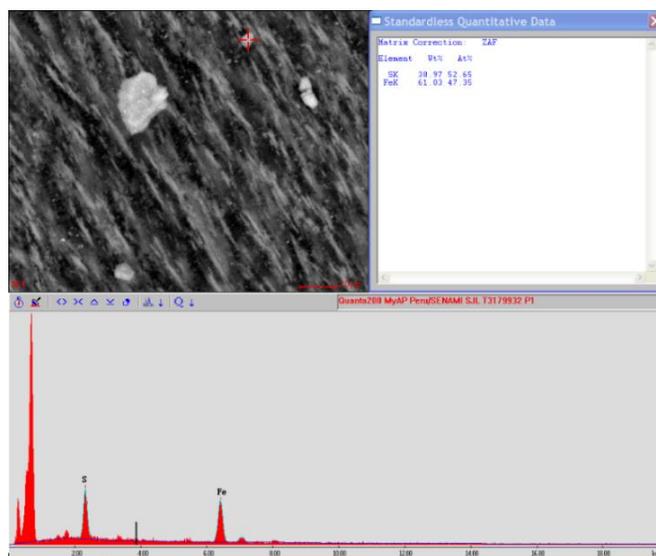


Figura 8: Sulfuro de hierro

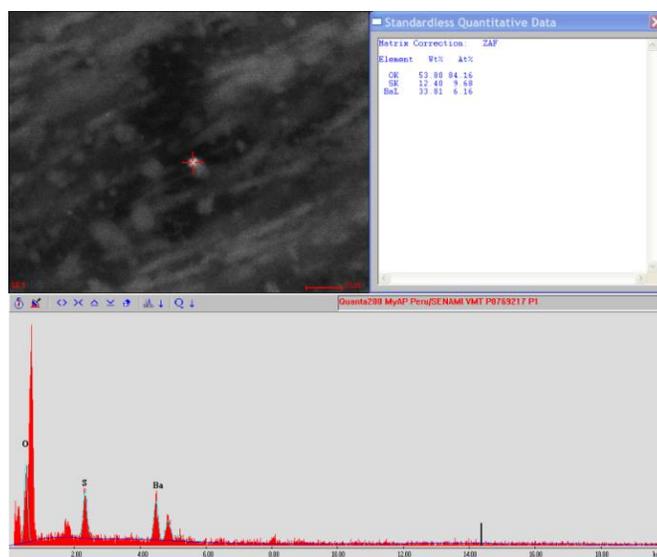


Figura 9: Sulfuro de bario

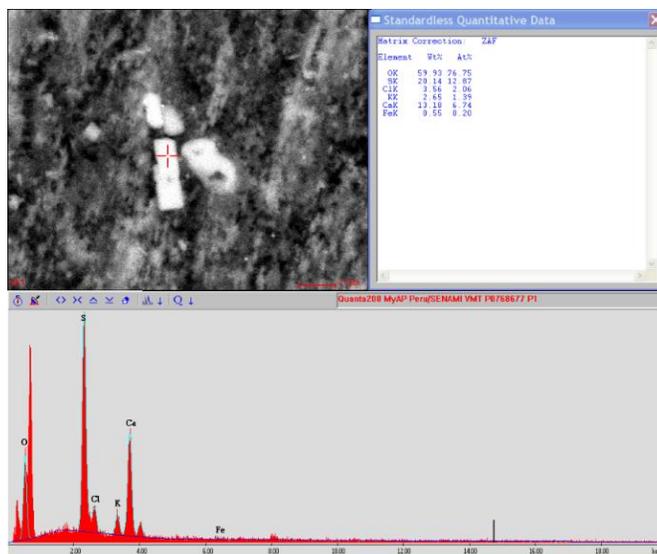


Figura 10: Yeso

c) Cloruros

Se hallaron cloruros de sodio (NaCl), cuya fuente es el océano, lo cual es razonable debido a la cercanía del mar a la costa (de Miranda *et al.*, 2002; Ramírez-Leal *et al.*, 2014). También cloruros de plomo, calcio y cloruro de potasio (usado en fertilizantes). Los cloruros ingresan a la atmósfera como resultado de la

neutralización del amoníaco, ácido clorhídrico que provienen de incineradores y centrales eléctricas (Harrison y Yin, 2000). Las reacciones secundarias están propiciando generación de aerosol secundario.

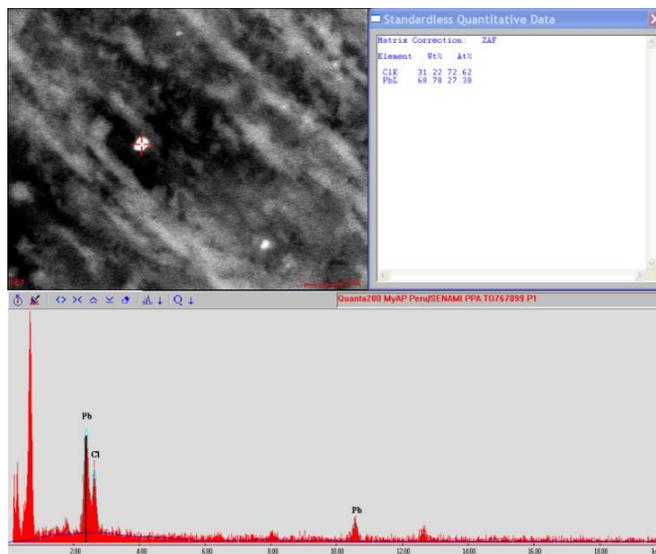


Figura 11: Cloruro de plomo

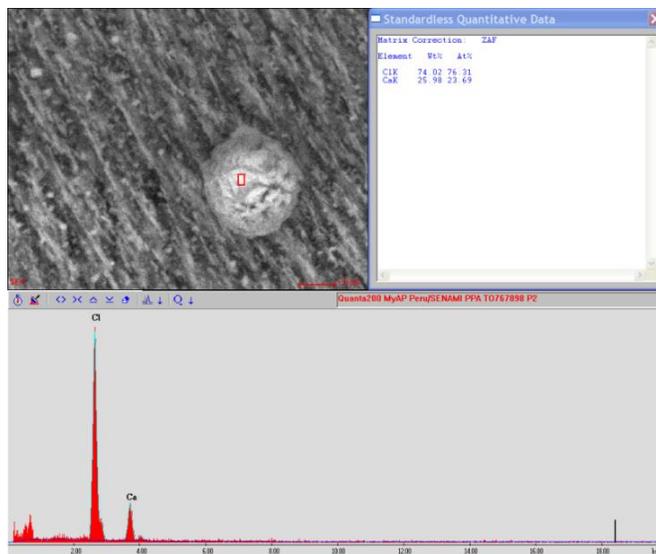


Figura 12: Cloruro de calcio

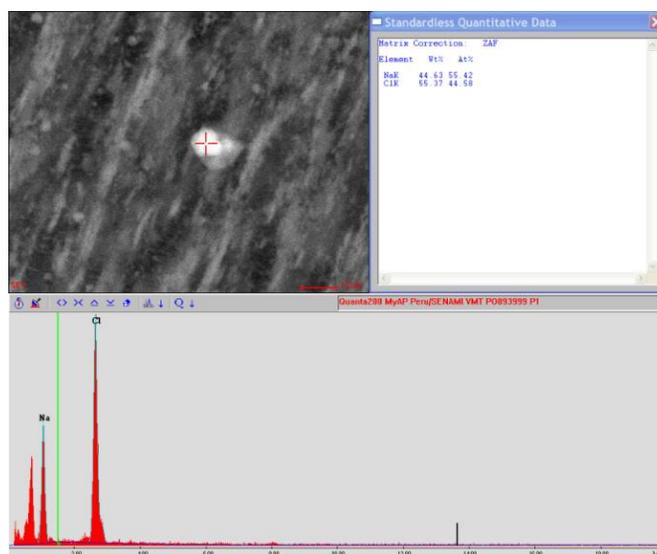


Figura 13: Cloruro de sodio

d) Metales

Se observaron partículas de titanio (Ti), aluminio (Al), zinc (Zn) y cobre (Cu), las cuales están asociadas a emisiones generadas por procesos industriales (de Miranda et al, 2002), también se hallaron partículas de níquel (Ni) y plomo (Pb), que están relacionadas con las emisiones del parque automotor (Machado *et al.*, 2008)(Li et al, 2012), el cromo (Cr) está asociado a la combustión del combustible (Tian et al, 2012), molibdeno (Mo) que se utiliza principalmente como elemento de aleación en acero, hierro fundido y metales no ferrosos (Xie et al, 2009) y estaño que en forma de casiterita nos indica actividades de metalurgia en la zona.

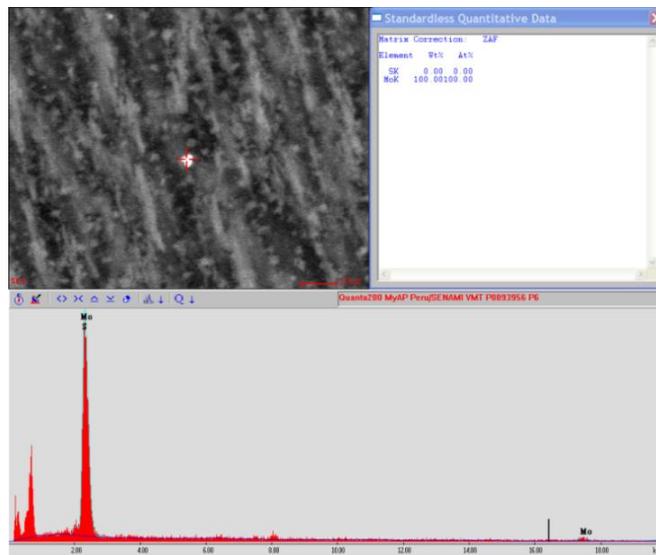


Figura 14: Partícula de molibdeno

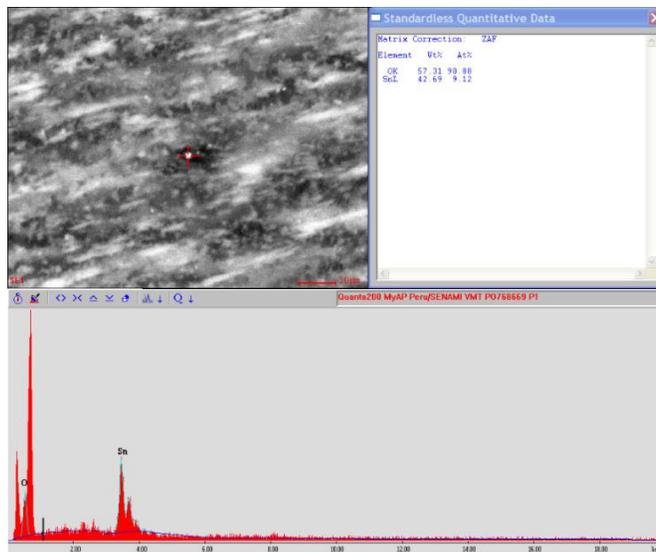


Figura 15: Partícula de estaño

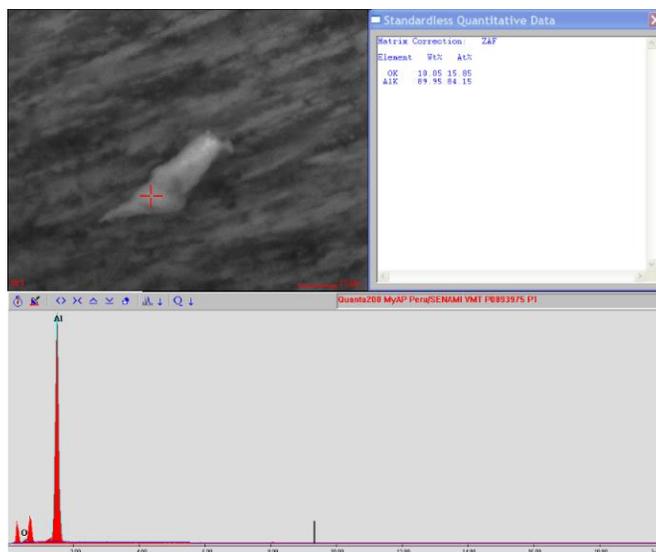


Figura 16: Partícula de aluminio

e) Elementos biológicos

Se halló material biológico, es decir segmentos de plantas, insectos y esporas, incluso cabello humano, que quizás se introdujeron al manipular el filtro durante el muestreo.

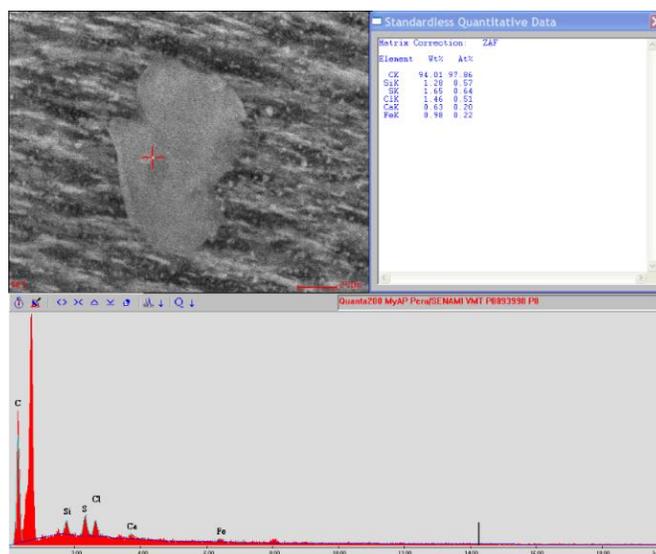


Figura 17: Elemento biológico

6.2 Análisis químico por punto de muestreo

Al analizar los resultados por punto de muestreo, estos demostraron la influencia de la dinámica zonal, por ejemplo en Ate la presencia de silicatos ferro magnesianos y cuarzos en gran proporción, detectando partículas de cobre, estaño y las trazas de carbón adherido pero en menor proporción. (Figura 19 - 26)

En Villa María del Triunfo la presencia de partículas de yeso, óxidos de calcio fue mayoritaria, se halló pequeñas proporciones de bario y baritina, que son usados como aditivos en la industria cementera. (Figura 27 - 34).

En Puente Piedra, la significativa presencia de cloro que estarían reaccionando con el calcio, aluminio, etc. En suma formando cloruros. También se identificaron pecas de carbón, plomo lo que indica la influencia de actividades de transporte. (Figura 35 - 38).

En San Juan de Lurigancho se identificó partículas micro porosas que están asociados a origen antrópico, producto de la combustión incompleta de combustible fósil y una alta presencia de partículas de hierro, en su mayoría óxidos de hierro (Figura 39-42).

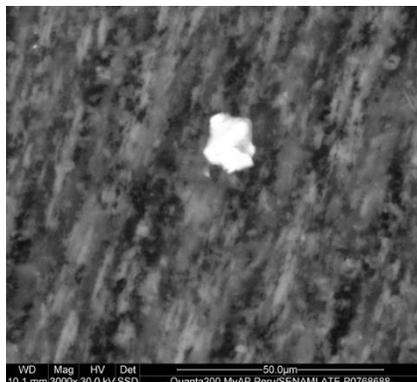


Figura 18: Partícula de óxido de hierro

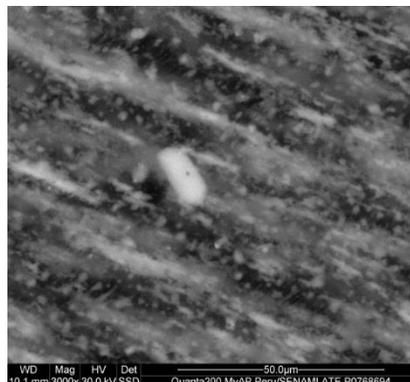


Figura 19: Partícula de azufre, óxido de hierro y una pizca de carbón

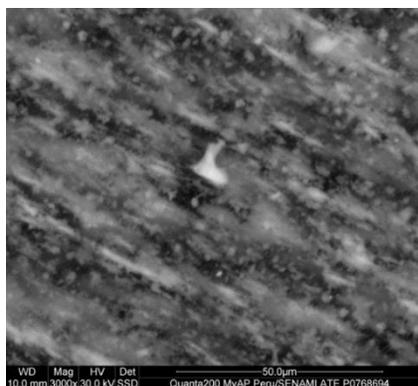


Figura 20: Partícula con cloro, níquel y azufre

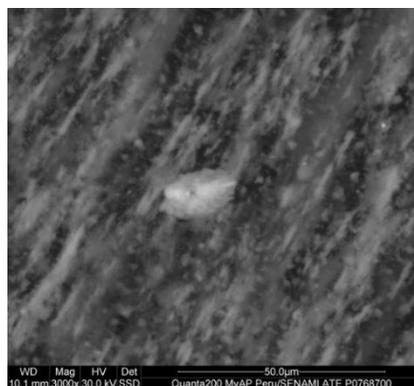


Figura 21: Cuarzo



Figura 22: Oxido de titanio y silicio

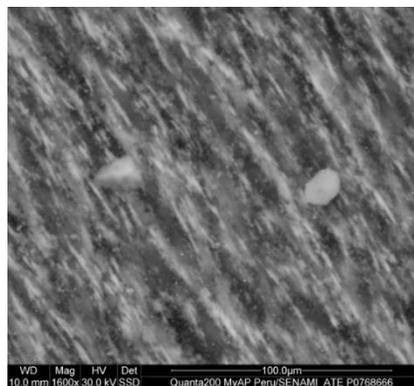


Figura 23: Cromo (izquierda) y Cloruro de calcio (derecha)

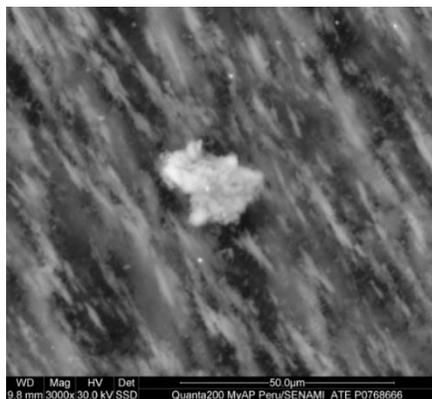


Figura 24: Silicato (silicio, aluminio, calcio)

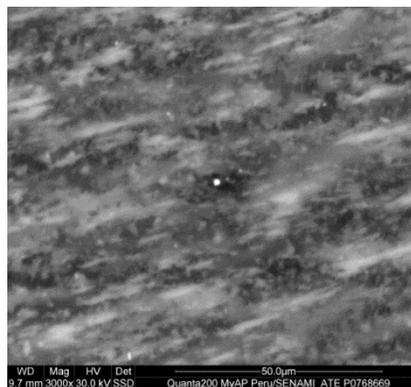


Figura 25: Estaño

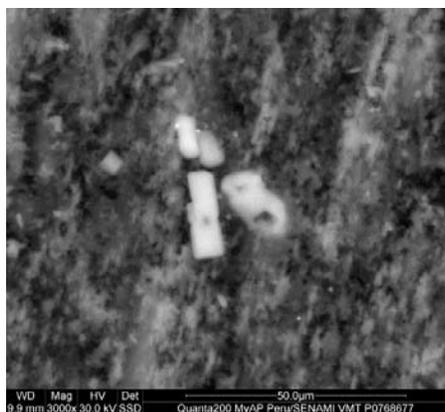


Figura 26: Partícula de yeso



Figura 27: Partícula de cloro, silicio y cadmio

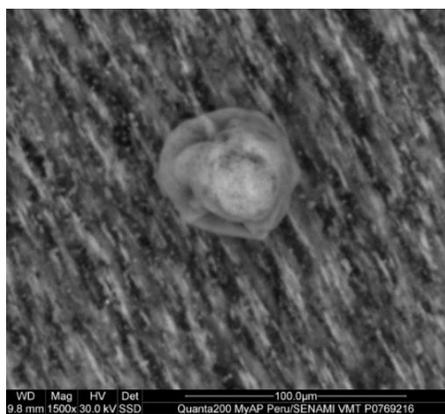


Figura 28: Oxido de calcio

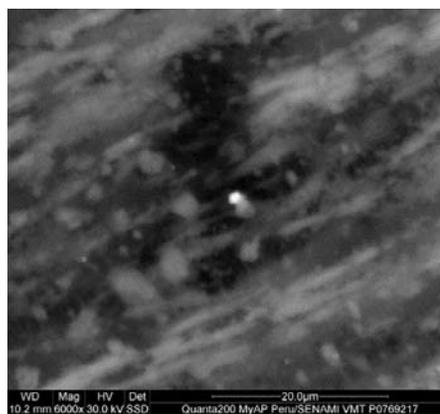


Figura 29: Sulfato de barita

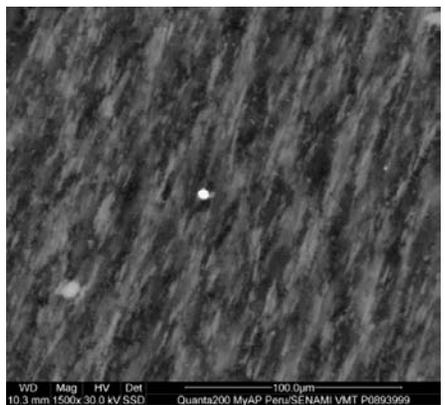


Figura 30: Bario

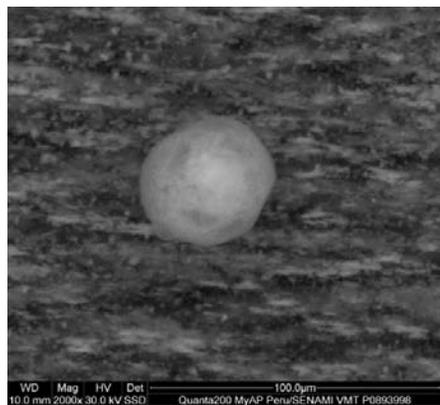


Figura 31: Cloruro de calcio

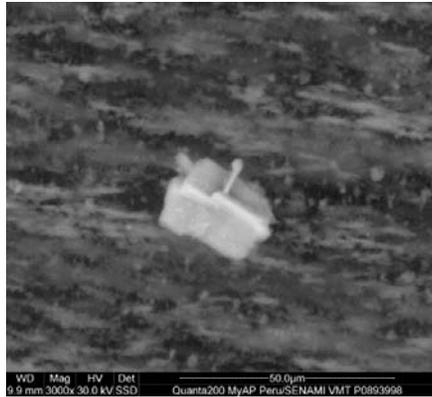


Figura 32: Óxido de hierro

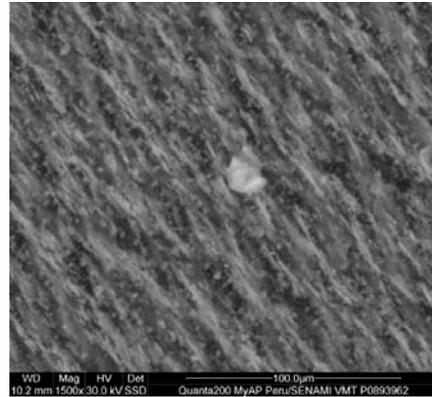


Figura 33: Apatita (fósforo, calcio y cloro)

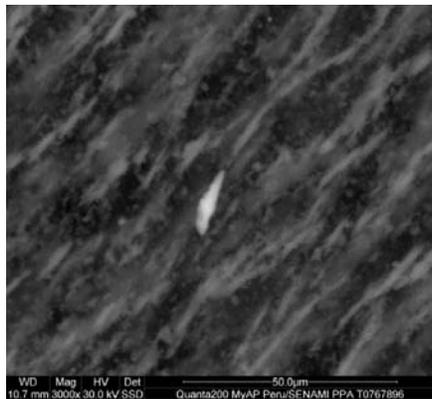


Figura 34: Cloruro de potasio

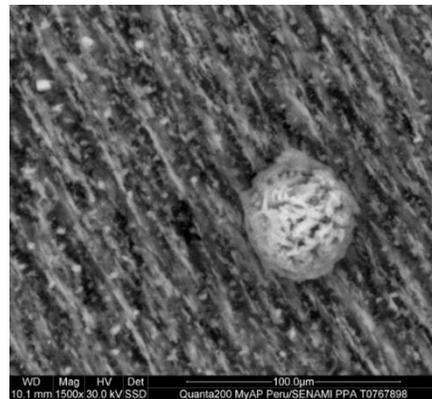


Figura 35: Cloruro de calcio

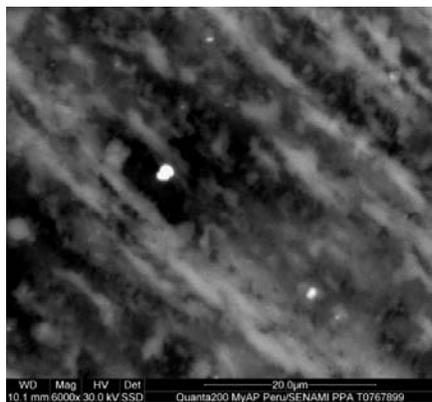


Figura 36: Cloruro de plomo

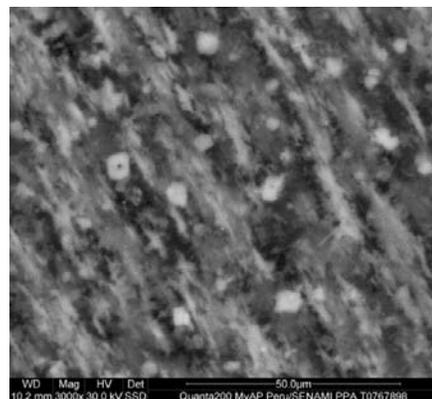


Figura 37: Cloruro de azufre con peca de carbón

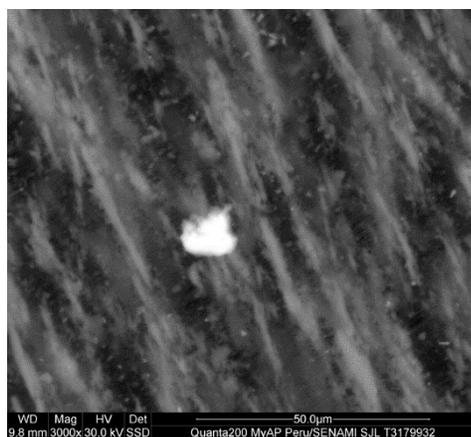


Figura 38: Pirrotita (Fe)

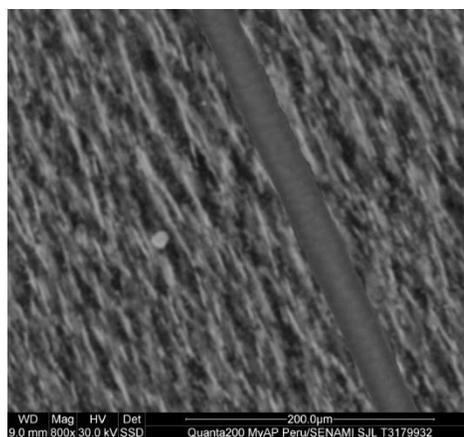


Figura 39: Cabello humano

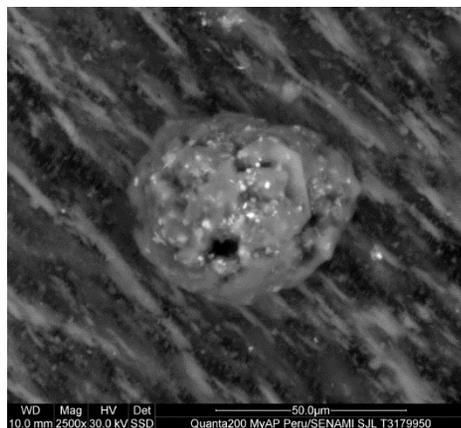


Figura 40: Partícula de hierro, silicio, cloro, sodio y aluminio

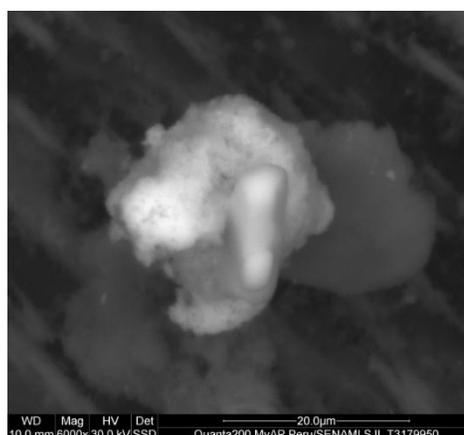


Figura 41: Sulfuro de cadmio

7 Análisis y discusión

Se identificaron fácilmente las partículas gruesas y finas, en aglomeraciones y heterogéneas de características morfológicas irregulares, como el silicio, aluminio, hierro y partículas esferoidales como el cloro y sodio; en cambio las partículas ultra finas (0.1 a 0.01 μm) no fueron detectadas satisfactoriamente debido al material del filtro que presentaba una trama de microfibras muy densa e irregular que enmascaraba este tipo de partículas, por lo que no se logró identificar totalmente.

La presencia de partículas de azufre y cloro tanto en sulfatos y cloruros indicaron que en la atmósfera están produciéndose reacciones químicas que reaccionan para formar aerosoles secundarios. Esto comprueba porque se

presentan altas concentraciones de material particulado en Lima, que superan los ECA, lo cual no sucede con los gases.

En Ate la presencia de silicatos ferro magnesianos y cuarzos nos indicaron un gran aporte de partículas de origen natural (re suspensión de suelo y/o meteorización de rocas), lo cual responde a las condiciones del distrito, ya que se encuentra en la zona este de la ciudad, rodeada de cerros agrestes y áridos, donde la cobertura vegetal en las vías y las áreas verdes públicas son escasas. El cobre, estaño y las trazas de carbón adheridos demostraron la influencia de las actividades de transporte y la construcción. El distrito es la entrada y salida de la Carretera Central, una de las vías para la región central del país por donde circulan diariamente vehículos livianos como pesados, para transportar alimentos que abastecen a Lima; asimismo, desde hace unos años se ha incrementado la construcción de departamentos y condominios familiares como parte del boom inmobiliario en Lima. En Villa María del Triunfo la presencia de partículas de yeso, óxidos de calcio fue mayoritaria, lo cual se encuentra asociado al tipo de suelo de la zona. Aquí las áreas verdes públicas también son escasas. En Puente Piedra, la significativa presencia de cloro que reacciona con otros elementos presentes en la atmósfera indicaría la formación de aerosoles secundarios. También se identificaron pecas de carbón, plomo lo que indica la influencia de actividades de transporte, siendo un punto de alto tránsito vehicular para el norte del país.

En San Juan de Lurigancho se identificó partículas micro porosas que están asociados a origen antrópico, producto de la combustión incompleta. La alta presencia de partículas de hierro (en su mayoría óxidos de hierro) determina la significativa influencia de la industria metal mecánica.

8 Conclusiones

La técnica de MEB permitió identificar una variedad de elementos químicos hallados en los filtros de PM_{2.5} mayoritariamente de origen natural, aunque se detectó partículas de origen antropogénico, debido a su característica de ultra finas no fueron satisfactoriamente detectadas en su totalidad. Los resultados permitieron distinguir cinco categorías: a) partículas de silicio, b) partículas de azufre, c) cloruros, d) metales y e) elementos biológicos.

Referencias Bibliográficas

- [1] Carbajal-Arroyo, L; Miranda-Soberanis, V; Medina-Ramón, M; Rojas-Bracho, L; Tzintzun, G; Solís-Gutiérrez, P; Méndez-Ramírez, I; Hurtado-Díaz, M; Schwartz, J y Romieu, I. 2011. Effect of PM10 and O3 on infant mortality among residents in the Mexico City Metropolitan Area: a case-crossover analysis, 1997e2005. *J. Epidemiol Community Health*, 65: 715-721.

- [2] De Miranda, R.M., Andrade, M.F., M, Worobiec, A y Van R. 2002.Characterisation of aerosol particles in the Sao Paulo Metropolitan Area. *Atmospheric Environment* 36:345-352
- [3] Errazuriz A; Cereceda, P; González, J; González, M; Henríquez, M y Rioseco, R. 1998. Manual de geografía de Chile. Ed. Andrés Bello.
- [4] Godish, T. 2004. Air quality. 4th ed., Lewis publishers
- [5] Harrison, R.M y Yin, J. 2000. Particulate matter in the atmosphere: which particle properties are important for its effects on health? *The Science of the Total Environment*, 249, 85-101.
- [6] Instituto Nacional de Defensa Civil – INDECI. 2010. Estudio para determinar el nivel de vulnerabilidad física ante la probable ocurrencia de un sismo de gran magnitud en el distrito de Villa María del Triunfo. Disponible en http://www.indeci.gob.pe/prev_desat/estudios/VILLA%20MARIA%20DE%20L%20TRIUNFO.pdf
- [7] Instituto Nacional de Defensa Civil – INDECI. 2010. Estudio para determinar el nivel de vulnerabilidad física ante la probable ocurrencia de un sismo de gran magnitud en el distrito de Ate. Disponible en http://www.indeci.gob.pe/prev_desat/estudios/ATE.pdf
- [8] Instituto Nacional de Defensa Civil – INDECI. 2010. Estudio para determinar el nivel de vulnerabilidad física ante la probable ocurrencia de un sismo de gran magnitud en el distrito de Ate. Disponible en http://www.indeci.gob.pe/prev_desat/estudios/PUENTE%20PIEDRA.pdf
- [9] Jacobson M. 2002. Atmospheric pollution, history, science and regulation. Cambridge University Press. 116- 142
- [10] Jorquera, H. Introducción a la Contaminación Atmosférica. Ediciones UC, 2010.
- [11] Li, Q., Cheng, H.G., Zhou, T., Lin, C., Guo, S., 2012. The estimated atmospheric lead emissions in China, 1990-2009. *Atmos. Environ.* 60, 1-8.
- [12] Machado, A., García, N., García, C., Acosta, L., Córdova, A., Linares, M., Giraldoth, D y Velásquez, H. 2008. Contaminación por metales (Pb, Zn, Ni y Cr) en aire, sedimentos viales y suelo en una zona de alto tráfico vehicular. *Rev. Int. Contaminación Ambiental.* 24 (4) 171-182.
- [13] Mamane, Y., Willis, R y Conner, T. 2001 Evaluation of Computer-Controlled Scanning Electron Microscopy Applied to an Ambient Urban Aerosol Sample, *Aerosol Science and Technology*, 34:1, 97-107

- [14] Municipalidad distrital de San Juan de Lurigancho. 2015. Plan de desarrollo concertado 2015-2021. Disponible en:
<http://munisjl.gob.pe/transparencia/plan-de-desarrollo-concertado-2015-2021.pdf>
- [15] Municipalidad Metropolitana de Lima - MML. 2013. Plan Metropolitano de Desarrollo Urbano de Lima – Callao 2035. Disponible en:
<http://www.transitemos.org/aprende-de-movilidad/plam-lima-y-callao-2035/>
- [16] Paoletti, L., De Berardis, B., Arrizza, L., Passacantando, M., Inglessis, M., Mosca, M., 2003. Seasonal effects on the physico-chemical characteristics of PM_{2.1} in Rome: a study by SEM and XPS. *Atmos. Environ.* 37, 4869e4879.
- [17] Ramirez-Leal, R., Valle-Martinez, M. y Cruz-Campas, M. (2014) Chemical and Morphological Study of PM₁₀ Analysed by SEM-EDS. *Open Journal of Air Pollution*, 3, 121-129.
- [18] Reyna, M; Bravo, M, López, R; Nieblas, E y Nava, M. 2012. Relative risk of death from exposure to air pollutants: a short-term (2003–2007) study in Mexicali, Baja California, México. *International Journal of Environmental Health Research*, 22, 370-86.
- [19] Saavedra, M; Calvo, M y Jiménez, C. 2011. Caracterización climática de la circulación atmosférica en América del Sur. *Revista de Investigación de Física* 14, 111401761.
- [20] Sánchez-Ccoyllo, O. R. y Ordóñez-Aquino, C. G. 2016. Evaluación de la calidad del aire en Lima Metropolitana 2015. Lima: SENAMHI.
- [21] Satsangi, P.G., Yadav, S., 2014. Characterization of PM_{2.5} by X-ray diffraction and scanning electron microscopy-energy dispersive spectrometer: its relation with different pollution sources. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 11, 217e232
- [22] Sawyer, L y Grubb, D., 1987. *Polymer Microscopy*. Chapman and Hall Ltd. 1, 23-25
- [23] Tian, H.Z., Lu, L., Cheng, K., Hao, J.M., Zhao, D., Wang, Y., Jia, W.X., Qiu, P.P., 2012. Anthropogenic atmospheric nickel emissions and its distribution characteristics in China. *Sci. Total Environ.* 417, 148e157.
- [24] Xie, R.K., Seip, H.M., Liu, L y Zhang, D.S. 2009. Characterization of individual airborne particles in Taiyuan City, China. *Air Quall Atoms Health*, 2(3):123-131.