



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE METALES PRESENTES
EN EL MATERIAL PARTICULADO PM10 Y EN PLANTAS EN ZONAS
URBANAS DE QUITO.

AUTOR

Tábatha Andrea Mancheno Villacís

AÑO

2020



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

DETERMINACIÓN DE LA CONCENTRACIÓN DE METALES PRESENTES EN
EL MATERIAL PARTICULADO PM₁₀ Y EN PLANTAS EN ZONAS URBANAS
DE QUITO.

Trabajo de Titulación presentado en conformidad con los requisitos
establecidos para optar por el título de Ingeniera Ambiental en Prevención y
Remediación

Profesora guía

Dra. Katuska Ferbel Alexandrino De Freitas

Autora

Tábatha Andrea Mancheno Villacís

Año

2020

DECLARACIÓN DEL PROFESOR GUÍA

"Declaro haber dirigido el trabajo, Determinación de la concentración de metales presentes en el material particulado PM₁₀ y en plantas en zonas urbanas de Quito, a través de reuniones periódicas con la estudiante Tábatha Andrea Mancheno Villacís, en el semestre 202010, orientando sus conocimientos y competencias para un eficiente desarrollo del tema escogido y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación".

Katiuska Alexandrino.

Katiuska Ferbel Alexandrino de Freitas

Ph. D. en Ingeniería Química y de Medio Ambiente

C.I.: 1758666109

DECLARACIÓN DEL PROFESOR CORRECTOR

"Declaro haber revisado este trabajo, Determinación de la concentración de metales presentes en el material particulado PM₁₀ y en plantas en zonas urbanas de Quito, de la estudiante Tábatha Andrea Mancheno Villacís, en el semestre 202010, dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación".



Rasa Zalakeviciute

Doctor of Engineering Science

C.I.: 1757076797

DECLARACIÓN DE AUTORÍA DEL ESTUDIANTE

“Declaro que este trabajo es original, de mi autoría, que se han citado las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes.”



Tábatha Andrea Mancheno Villacís

C.I.: 0604044669

AGRADECIMIENTOS

A Dios por permitirme culminar esta nueva etapa, llena de bendiciones y experiencias maravillosas.

A mi familia por su esfuerzo para ayudarme a cumplir esta meta. A mi madre Jenny por su preocupación y apoyo; a mi padre Ángel por cada palabra de aliento; y a mi hermana Daniela por cuidarme.

A mi tutora Katuska, por ser una guía primordial en este trabajo y por brindarme sus conocimientos.

A mis amigas por darme ánimos para salir adelante y permitirme aprender más de la vida a su lado. Y finalmente a todas aquellas personas que durante estos 5 años me apoyaron para que este sueño se haga realidad.

DEDICATORIA

Con todo cariño dedico esta tesis a mi familia, por ser el motor y la inspiración para alcanzar todos mis sueños.

RESUMEN

En este documento se buscó evaluar los metales presentes en el aire ambiente de la ciudad de Quito. Esta evaluación se realizó a través del análisis químico del material particulado con diámetros aerodinámicos ≤ 10 micrómetros (PM_{10}), recolectado en las estaciones de monitoreo Belisario, Chillos y Tababela, durante los años 2017 y 2018. También, se realizó el análisis químico de las muestras de plantas, de la especie *Araucaria heterophylla*, recogidas cerca de las estaciones, durante los meses de agosto, septiembre y noviembre de 2019. Todas las muestras de filtros con PM_{10} y de las plantas fueron sometidas a extracción ácida para determinar la concentración de elementos químicos a través del análisis de Espectrometría de Emisión Óptica de Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES). Una vez obtenidos los datos, ambos materiales fueron analizados individualmente y comparados entre sí. Al revisar los resultados de los metales de origen antrópico de las 3 estaciones, se encontró que los valores más elevados, en Belisario indican mayor influencia del tráfico vehicular (Cd, Cr, Mn, Ni, Pb, y Sr); y en Los Chillos suponen la presencia de actividades industriales cercanas (Cu, Zn, y V). Para el caso de Tababela solamente se identificaron concentraciones máximas en metales de origen natural debido a que es la zona con menor incidencia humana a pesar de su cercanía al aeropuerto Mariscal Sucre. Finalmente, en todos los sitios se cumple que, el K, Mn, Ca, y Mg fueron identificados en mayor concentración en las hojas de *Araucaria heterophylla*, mientras que el Cr, Cu y Pb presentaron los valores más altos en los filtros del PM_{10} .

Keywords: PM_{10} , *Araucaria heterophylla*, metales

ABSTRACT

The current document evaluated the presence of metals in the air of Quito. During 2017 and 2018, this assessment performed by the chemical analysis of the particulate material with aerodynamic diameters ≤ 10 micrometers (PM₁₀), collected at Belisario, Chillos, and Tababela monitoring stations. Furthermore, the chemical analysis of the plants' samples of the species *Araucaria heterophylla*, collected near the stations, during August, September, and November 2019. The acid extraction method was applied in all filter samples with PM₁₀ and plants to determine the concentration of chemical elements through Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry analysis (ICP - OES). Once we obtained the data, both materials were analyzed individually and compared to each other. The metals results of anthropic origin at the three stations indicate that Belisario station has the highest influence of vehicular traffic (Cd, Cr, Mn, Ni, Pb, and Sr). Los Chillos station assumed the presence of industrial activity (Cu, Zn, and V). Tababela only implies the maximum concentration of natural origin metals because it is the area with the lowest human incidence, despite its proximity to Mariscal Sucre airport. Finally, at all sites, it is fulfilled that, K, Mn, Ca, and Mg were identified in higher concentration in the leaves of *Araucaria heterophylla*, while Cr, Cu, and Pb obtained the highest values in the filters with PM₁₀.

Keywords: PM₁₀, *Araucaria heterophylla*, metals

ÍNDICE

1. CAPÍTULO 1: Introducción	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Alcance	5
1.3. Justificación	5
1.4. Objetivos.....	7
1.4.1. Objetivo general.....	7
1.4.2. Objetivos específicos.....	7
2. CAPÍTULO 2: Marco teórico	8
2.1. Atmósfera y contaminación atmosférica	8
2.2. Situación de la contaminación atmosférica en Quito	9
2.3. Métodos de medición de contaminantes	10
2.4. Material Particulado: Definición y Clasificación.....	12
2.4.1. Partículas gruesas PM ₁₀	12
2.5. Plantas como bioindicadores.....	17
2.5.1. Uso de coníferas como biomonitores de metales en el aire	18
2.5.2. Araucaria heterophylla.....	19
2.6. Análisis de metales - Espectrometría de emisión óptica de plasma	22
3. CAPÍTULO 3: Metodología.....	23
3.1. Área de estudio.....	23
3.2. Muestreo.....	26
3.2.1. Recolección de muestras de PM ₁₀	26

3.2.2.	Recolección de muestras de hojas de la <i>Araucaria heterophylla</i> ..	27
3.3.	Procedimiento experimental	28
3.3.1.	Material particulado PM ₁₀	28
3.3.2.	Hojas de <i>Araucaria heterophylla</i>	30
3.4.	Análisis de elementos químicos en las muestras de PM ₁₀ y <i>Araucaria heterophylla</i>	33
3.5.	Tratamiento de datos.....	34
3.5.1.	Material particulado PM ₁₀	34
3.5.2.	Hojas de <i>Araucaria heterophylla</i>	36
3.6.	Métodos estadísticos.....	38
4.	CAPÍTULO 4: Resultados y Discusión.....	39
4.1.	Concentración de elementos químicos en los filtros de material particulado PM ₁₀	39
4.1.1.	Análisis de Componentes Principales.....	42
4.1.2.	Análisis de varianza ANOVA	50
4.2.	Concentración de elementos químicos en hojas de <i>Araucaria heterophylla</i>	53
4.2.1.	Análisis de varianza ANOVA	57
4.3.	Comparación de las concentraciones de los elementos químicos obtenidas en los filtros y en las hojas de <i>Araucaria heterophylla</i>	59
4.3.1.	Análisis de varianza ANOVA	65
5.	Conclusiones y Recomendaciones.....	67
5.1.	Conclusiones.....	67
5.2.	Recomendaciones.....	68

REFERENCIAS

ANEXOS

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Muestreador de alto volumen para PM ₁₀	17
Figura 2. Ejemplos de coníferas y sus diferentes alturas.	18
Figura 3. Araucaria heterophylla	21
Figura 4. Ubicación de los sitios de recolección de muestras	24
Figura 5. Muestreador de alto volumen.....	26
Figura 6. Procedimiento de análisis del ICP-OES.....	33
Figura 7. Esquema del procedimiento experimental para la extracción y análisis de elementos químicos del material particulado PM ₁₀ y material vegetal.....	34
Figura 8. Comparación de las concentraciones promedio anual de PM ₁₀ (µg/m ³), en los años 2017 y 2018, con la normativa nacional e internacional vigente, para cada estación estudiada.....	41
Figura 9. Resultados del Análisis del Componente Principales de la estación Belisario	44
Figura 10. Resultados del Análisis del Componente Principales de la estación de Los Chillos.....	47
Figura 11. Resultados del Análisis del Componente Principales de la estación Tababela	49
Figura 12. Comparación de las concentraciones promedio de los filtros de PM ₁₀ y hojas de Araucaria heterophylla de las estaciones en estudio durante los meses de agosto, septiembre y noviembre	64

1. CAPÍTULO 1: Introducción

1.1. Antecedentes

La contaminación ambiental es uno de los problemas más graves que impactan este siglo (Montaño & Sandoval, 2007). En particular la contaminación atmosférica constituye una creciente amenaza para la salud pública, el bienestar humano y la integridad de los ecosistemas (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente [PNUMA], 2014). En una reciente publicación de la Organización Mundial de la Salud (OMS) (2018), denominada “Calidad del aire y salud”, se establece que este tipo de contaminación causa alrededor de 4,2 millones de muertes prematuras por año. Aproximadamente, el 58% de estos decesos se deben a cardiopatías isquémicas y accidentes cerebrovasculares, el 18% a enfermedades pulmonares obstructivas crónicas e infecciones respiratorias agudas, y el 6% a cáncer de pulmón. A pesar de que este tema tiene trascendencia global, la mayor parte de estas afecciones recae sobre los habitantes de países en vías de desarrollo, provocando efectos más graves sobre los grupos vulnerables como niños, ancianos y personas con problemas de salud (Organización Mundial de la Salud [OMS], 2005).

La mala calidad del aire tiende a incrementar rápidamente a nivel mundial, pero se presenta de manera especial en las zonas urbanas de países en donde las primeras etapas del desarrollo industrial buscan el crecimiento económico, dejando de lado la protección del medio ambiente (Ledesma, 2014). Como ejemplo, se puede citar a la ciudad de Quito, que décadas atrás, estaba poblada por algunos centenares de miles de habitantes, pero ahora su población sobrepasa los 2 millones y medio. Este deliberado crecimiento demográfico y progreso, sumado a la carga producida por las poblaciones aledañas que prácticamente se han incorporado a la ciudad, han producido muchos problemas ambientales, cada uno de ellos causantes, en mayor o menor medida, del deterioro de la calidad del aire (Municipio del Distrito Metropolitano de Quito, 2014a; Noriega, 2008).

La relación entre las emisiones y los niveles de contaminación de cada lugar no sólo depende de la población sino también de las características intrínsecas del sitio. Por ejemplo, la infraestructura y el ordenamiento territorial determinan el modelo de emisión, mientras que las condiciones meteorológicas y la topografía establecen la dispersión y la transformación de los contaminantes (Rossini & Fernández, 2007).

En Ecuador, la preocupación por la calidad del aire es reciente, por lo que, lamentablemente, la investigación acerca de este tema es muy escasa. No obstante, existen algunos trabajos, como es el caso de "Evaluación de la contaminación del aire a filo de calle en el centro histórico de Quito", en donde se analizó el comportamiento de varios contaminantes criterio en un punto de alto tráfico y se identificó la influencia de factores meteorológicos en los niveles de los contaminantes y sus correlaciones (Chuquer et al., 2018).

A pesar de las deficiencias a nivel nacional, el Distrito Metropolitano de Quito (DMQ) cuenta con información constante y veraz acerca de las emisiones de contaminantes comunes, debido a que posee la Red Metropolitana de Monitoreo Atmosférico (REMMAQ) (Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales [FLACSO], Ministerio del Ambiente [MAE], & PNUMA, 2008). Esta red fue creada en el 2002 por la Empresa de Desarrollo del Centro Histórico (ECH). En el 2004 pasó a ser manejada por la Corporación para el Mejoramiento del Aire de Quito (CORPAIRE) y desde el 2010 es gestionada por la Secretaría de Ambiente (Franco, 2015). La información generada por esta red es útil en la organización, realización y ejecución de políticas y acciones enfocadas a mejorar la calidad del aire, y a su vez, permite que estos datos lleguen a la población en términos fáciles de comprender (Secretaría de Ambiente, 2016).

El material particulado (PM) es uno de los contaminantes comunes que se analizan en la REMMAQ. Las partículas suspendidas son ampliamente estudiadas en todo el mundo, ya que provocan muchos impactos negativos tanto en los componentes bióticos como abióticos sobre los cuales se depositan o entran en contacto. Por ello, la medición y análisis de su comportamiento, relacionado con fenómenos meteorológicos, composición

química y origen genera mucho interés por parte de las autoridades (Arcínegas, 2012). De hecho, existen algunos estudios en la ciudad de Quito, acerca de los impactos del material particulado en la salud de las personas, se puede mencionar la investigación sobre la toxicidad in vitro del PM presente en el aire de algunas zonas de la ciudad, mediante el cual se comprobó que el material fue capaz de activar la inflamasa NLRP3 y las rutas de señalización TLR2 y TLR4 (Cevallos, Díaz, & Sirois, 2017). También se han realizado varias investigaciones alrededor del mundo. En Colombia, por ejemplo, se realizó un estudio acerca de las características y variaciones temporales de la fracción carbonosa del PM₁₀, en la ciudad de Bogotá, a través del análisis de filtros de cuarzo por un método térmico-óptico (Ramírez, Sánchez, & De la Rosa, 2018).

Entre los componentes del material particulado que causan mayores repercusiones, destacan los metales y metaloides. A diferencia de los contaminantes de origen orgánico, los metales no se pueden degradar ni biológica ni químicamente; su distribución, movilidad, disponibilidad y toxicidad no es función de la concentración total, sino que depende de la forma química en la que se presenten (Reyes, Vergara, Torres, Díaz, & González, 2016). Estos elementos, cuando se encuentran de manera natural en el medio ambiente, casi en su totalidad no causan efectos negativos sobre las diferentes formas de vida; el problema radica cuando su concentración aumenta, fundamentalmente debido a las actividades antrópicas (Covarrubias & Peña, 2017).

Así mismo, los metales pueden bioacumularse en los seres vivos, principalmente en los árboles urbanos, ya que son organismos sedentarios que permanecen estáticos. Estas especies vegetales cumplen varias funciones y, por lo general, ayudan a mejorar la calidad del entorno urbano, consiguiéndose más beneficios si se aplican criterios técnicos en su selección, ubicación y mantenimiento (Ledesma, 2014). Entre los roles que cumplen los árboles urbanos están la disminución de la temperatura y otros efectos microclimáticos, la emisión de compuestos orgánicos volátiles y, la supresión de los contaminantes de la atmósfera (Nowak, 2002), mediante dos formas:

deposición en las superficies de las plantas y/o captación estomática (Grote et al., 2016).

Gracias a la capacidad de las plantas para asimilar elementos traza de la atmósfera circundante y bioacumularlos en sus tejidos, se puede emplear una amplia variedad de especies vegetales como monitores biológicos con el fin de evaluar la polución en un área (Bu-Olay & Thomas, 2009). La técnica de biomonitorio constituye una de las mejores alternativas para el análisis de la contaminación debido a que las plantas proporcionan información cuantitativa y cualitativa de los contaminantes atmosféricos, como los metales, y a su vez, de los efectos que producen en los sistemas vivos, a cambio de bajos costos y métodos fáciles de muestreo (Noriega, 2008; Rossini & Fernández, 2007). Se pueden citar algunos trabajos, por ejemplo, en Argelia, un estudio analizó la capacidad de *Cupressus sempervirens* y *Eucalyptus cladocalyx*, para evaluar la contaminación del aire mediante Cd, Cu, Pb y Zn, demostrando que dichas especies arbóreas podrían usarse para la fitoextracción de metales pesados de los suelos y/o aire contaminados (Alatou & Sahli, 2019). Otra investigación, que se realizó en Italia, comparó las capacidades de acumulación de metales en las especies *Quercus ilex L.* y *Olea europaea L.*, y evaluó el impacto de actividades antropogénicas en áreas industriales y urbanas, concluyendo que la primera especie es mejor como biomonitor debido a su distribución más amplia y mayor capacidad de absorción (Baldantoni, De Nicola, & Alfani, 2014).

En la actualidad, los procesos analíticos basados en espectrometría de plasma acoplado inductivamente (ICP), se han convertido en algunos de los más populares y confiables, en cuanto se refiere al análisis de concentraciones de elementos químicos (Sawidis, Marnasidis, Zachariadis, & Stratis, 1995). Estas técnicas permiten mediciones rápidas y precisas de múltiples perfiles de archivos cuando se combinan con métodos apropiados para la preparación de muestras.

1.2. Alcance

El presente estudio se realizó bajo los proyectos de investigación: “Chemical composition of PM pollution in high elevation urban area, a case study of Quito, Ecuador (AMB.RZ.19.01)” y “Detection and quantification of the metals and the Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) accumulated in a bioindicador foliage at urban areas of Quito, Ecuador (AMB.KAF.19.04)”, financiados por la UDLA. Este trabajo buscó evaluar, cualitativa y cuantitativamente, elementos químicos presentes en el aire ambiente de la ciudad de Quito. La evaluación se realizó a través del análisis químico del material particulado PM₁₀, recolectado en estaciones de monitoreo del aire de la Secretaria de Ambiente de Distrito Metropolitano de Quito: Belisario, Los Chillos y Tababela, durante los años 2017 y 2018, y a través del análisis químico de muestras de hojas de *Araucaria heterophylla* recogidas cerca de las estaciones de monitoreo.

1.3. Justificación

La presencia de contaminantes en la atmósfera es un problema de trascendencia mundial que afecta a todos los seres vivos. Entre los contaminantes más importantes, se destaca el material particulado, ya que, además de generar repercusiones en la salud, produce efectos negativos en la visibilidad, la infraestructura y genera consecuencias económicas y sociales (Egas, Naulin, & Préndez, 2018).

Con respecto a los efectos médicos, varias investigaciones han demostrado que el material particulado inhalable PM₁₀ (con diámetros aerodinámicos $\leq 10 \mu\text{m}$) ingresa profundamente hasta los pulmones provocando enfermedades cardiovasculares, respiratorias, y trastornos neurodegenerativos (Astudillo et al., 2015). En concreto, un estudio de la OMS revela que el PM₁₀ fue responsable de aproximadamente 3 millones de muertes y 85 millones de años de vida ajustados por discapacidad en el año 2012 (OMS, 2016).

Alrededor del mundo, en regiones como América del Norte, Europa Occidental y Asia, se han realizado numerosos estudios sobre la distribución de fuentes de material particulado. Sin embargo este tipo de investigaciones son poco frecuentes en América Latina, especialmente en ciudades que se encuentran a mayor altitud, donde el aire presenta densidades bajas como es el caso de Quito (Zalakeviciute, Rybarczyk, Granda, Díaz, & Alexandrino, 2020).

De manera semejante, las plantas también sufren las consecuencias de la contaminación del aire. Estos organismos están sometidos a estrés constante y obligados a soportar elementos tóxicos, debido a las condiciones adversas que prevalecen en el medio urbano donde se encuentran emplazados (Ledesma, 2014). En particular, la captura del material particulado, a pesar de ser un servicio ecosistémico de la vegetación, afecta significativamente su valor, ya que este contaminante obstruye los estomas de las hojas alterando el intercambio gaseoso y con ello la actividad fisiológica (Egas et al., 2018).

En Ecuador, la gestión de la calidad del aire es uno de los temas menos abordados (Páez, 2012). A pesar de que existen algunos trabajos de las ciudades más grandes, en general, no se dispone de información suficiente para precisar los niveles de contaminación a los que se encuentran expuestas las personas, y con ello los riesgos que diariamente enfrentan. Para obtener estos datos, actualmente existen varias técnicas de monitoreo que implican el uso de equipos costosos y personal calificado, así como mantenimiento frecuente de los mismos. Sin embargo, el empleo de plantas proporciona información, no sólo cualitativa y cuantitativa, sino también acerca de los impactos de los contaminantes en los sistemas vivos (Ledesma, 2014).

En el caso de los países en vías de desarrollo, el uso de plantas como monitores biológicos se considera particularmente apropiado. Generalmente en estos lugares la red de monitoreo de calidad del aire es limitada mientras que el biomonitoreo permite determinar la distribución de los contaminantes a gran escala, incrementando la resolución de la información (De Temmerman et al., 2004). Una de las mayores ventajas de este método es la amplia variedad de

especies distribuidas en las zonas urbanas que pueden usarse como monitores de contaminantes del aire (Darley, 2012).

Este trabajo busca aportar con información veraz acerca de la presencia y concentración de elementos químicos, principalmente metales, presentes en el aire ambiente de la ciudad de Quito. A través de esta información, se podrá identificar y caracterizar las fuentes de emisión responsables de los mayores aportes y los riesgos potenciales en la salud (Abril et al., 2014), ya que actualmente los estudios sobre química de material particulado en esta ciudad se limitan a un estudio para la calidad del aire interior y exterior (Raysoni et al., 2017). Además, estos datos permitirán que los responsables de la toma de decisiones, puedan analizar de manera objetiva el impacto de las concentraciones de estos contaminantes sobre la población, para que, más adelante, se desarrollen planes y políticas enfocadas a mejorar la situación de la capital (OMS, 2016). Por último, este documento constituye un aporte académico que puede sentar las bases para futuras investigaciones y servir como referente para estimar la magnitud del problema en otras ciudades del país.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Determinar la concentración de metales presentes en el material particulado PM_{10} y en plantas en zonas urbanas de Quito

1.4.2. Objetivos específicos

- Cuantificar los metales presentes en los filtros de las estaciones de monitoreo de PM_{10} seleccionadas y en las plantas recogidas en el área de estudio.
- Comparar las concentraciones de metales obtenidas en los filtros y en las plantas.

2. CAPÍTULO 2: Marco teórico

2.1. Atmósfera y contaminación atmosférica

La atmósfera de la Tierra está formada por un conjunto de gases y partículas que rodean la Tierra, denominado “aire”. Por millones de años, este componente gaseoso, ha experimentado muchos cambios hasta llegar a su composición actual, que permite el desarrollo de la vida tal y como la conocemos (Contreras, García, & Icaza, 2013). El aire está compuesto de nitrógeno en un 78.08%; oxígeno en un 20.94%; argón en un 0.93%; dióxido de carbono en un 0.03%; vapor de agua y otros elementos traza como óxidos de azufre y nitrógeno, metano, amoníaco, ozono y gases nobles, en concentraciones muy pequeñas (Escribano & Tanarro, 2006). En su estructura, se diferencian 4 capas: troposfera, estratosfera, mesosfera y termosfera. La troposfera es considerada como la capa más importante ya que, además de su cercanía con la superficie terrestre, en su interior se concentra alrededor del 80% de la masa total y la fracción más grande de vapor de agua (Dowling & Showman, 2007).

Las proporciones de cada componente en la atmósfera permiten mantener un equilibrio (Instituto Nacional de Ecología [INE], s/f), donde no se presentan efectos adversos en la salud humana, los recursos naturales y la armonía ecológica. El problema radica cuando se introducen agentes físicos, químicos o biológicos, en cantidades mayores a las habituales, los cuales alteran las propiedades físicas o químicas del aire. Esto se conoce como contaminación atmosférica (Romero, Diego, & Alvarez, 2006). El Ministerio de Ambiente del Ecuador (2010) define a la contaminación del aire como:

“La presencia de sustancias en la atmósfera, que resultan de actividades humanas o de procesos naturales, presentes en concentración suficiente, por un tiempo suficiente y bajo circunstancias tales que interfieren con el confort, la salud o el bienestar de los seres humanos o del ambiente.”

Existe un grupo prioritario de contaminantes atmosféricos, conocidos como criterio, debido al notable impacto que producen en el deterioro de la calidad del aire, así como los numerosos beneficios que conlleva su adecuado control (PNUMA, 2014). Dentro de este grupo se encuentran: el dióxido de azufre (SO₂), el dióxido de nitrógeno (NO₂), el material particulado (PM), el monóxido de carbono (CO) y el ozono (O₃) (Koren, 1995).

2.2. Situación de la contaminación atmosférica en Quito

La gestión de la calidad del aire en Ecuador, presenta grandes inconvenientes como el incumplimiento de tratados y convenios; la dispersión legislativa y de poderes en el estado; y la debilidad institucional del Ministerio de Ambiente, que es el organismo encargado de administrar la política ambiental en el país (MAE, 2010). A nivel nacional, de las 17 ciudades con mayor tendencia a mostrar problemas en la calidad del aire, debido al número, distribución y principales actividades económicas de la población, solamente Quito, Cuenca y Guayaquil han implementado planes de acción, siendo el Municipio del Distrito Metropolitano de Quito, el pionero en este tema (Páez, 2012).

Las principales causas de la emisión de contaminantes a la atmósfera en las ciudades de los países en desarrollo, como Quito, son: la expansión no planificada del área urbana, la falta de control a las industrias y el empleo de tecnologías poco modernas en los sectores productivo y de transporte (MAE, 2010). Paralelamente, se desarrollan otros factores, como las debilidades del servicio del transporte público, las facilidades de adquisición vehicular y el bajo costo de los combustibles. Como consecuencia, en el Distrito Metropolitano de Quito, anualmente, se emiten aproximadamente 2740 toneladas de sustancias contaminantes al aire, de las cuales el 53% son ocasionadas por el parque automotor. Además, en esta ciudad, el modelo de desarrollo urbano favorece el crecimiento hacia los extremos y los valles, lo cual obliga a que diariamente los habitantes hagan mayor número de viajes y cada vez más largos, para acceder a los lugares de trabajo, a las instituciones educativas y a las zonas de

entretenimiento. Todas estas causas estimulan el crecimiento de la tasa de motorización que incrementó un 28,5%, pasando de 145 automóviles, por cada mil personas, en el 2002 a 187 en el año 2008, y de continuar esta tendencia, en el año 2025 se llegaría a los 453 vehículos (Núñez, Narváez, Arteaga, Mena, & Rojas, 2009). Cabe mencionar que se realizó un análisis exhaustivo del impacto de las regulaciones de combustible y transporte sobre la contaminación por partículas finas en la ciudad de Quito, con el objetivo de identificar los problemas existentes y cuantificar el efecto de las iniciativas de mejora de la calidad del aire a largo plazo. Los datos (2007 - 2016) fueron analizados mediante la elaboración de un modelo de regresión, con el cual se estimó que las concentraciones de $PM_{2.5}$ se redujeron a 17.4 mg/m^3 , combatiendo el efecto del crecimiento de la ciudad y motorización intensa (Zalakeviciute, Rybarczyk, López, & Diaz, 2018).

Por otro lado, la topografía de Quito, propicia la formación de un escenario de vulnerabilidad a la contaminación atmosférica. Concretamente, esta ciudad se encuentra ubicada a 2800 m.s.n.m., lo cual disminuye la eficiencia de la combustión, resultando en la generación de mayor carga contaminante. Asimismo, la proximidad de esta urbe a volcanes, como el Reventador, el Guagua y el Ruco Pichincha, limita la circulación de las corrientes de aire y empeora los episodios de polución. Finalmente, la situación ecuatorial, provoca la presencia de altos niveles de luminosidad, lo cual favorece la ocurrencia de reacciones fotoquímicas que originan el smog (Páez, 2012). A todas estas características intrínsecas del lugar se debe añadir el aporte antrópico derivado del desarrollo industrial (Astudillo et al., 2015).

2.3. Métodos de medición de contaminantes

La exposición humana a contaminantes atmosféricos en zonas pobladas, se puede calcular a través de la medición de la concentración de dichos compuestos en un punto de muestreo fijo, utilizando equipos manejados en base a procedimientos de referencia. El resultado obtenido se acepta para

todas las personas que habitan en el área de influencia (Campos, Acosta, Gómez, Carrillo, & Ramírez, 2015). Antes de seleccionar el método de medición más adecuado, es indispensable determinar el compuesto o elemento químico de interés, concretar la necesidad de preservación de la muestra y establecer los rangos de concentración para la valoración (Galvão et al., 2018).

De acuerdo a los principios de medición, se pueden identificar 5 metodologías: muestreo pasivo, muestreo activo, método automático, sensores remotos y muestreo con bioindicadores (Galán, 2013; Inche, 2004; Jiménez, 2007). El muestreo pasivo es un método económico que no requiere suministro de energía (Abdulaziz, Al-Nadji, Kadri, & Kakosimos, 2017), sino que depende de las fuerzas físicas de deposición, intercepción y atracción para recolectar y retener contaminantes como gases, vapores orgánicos, y partículas (Einstein et al., 2012). A diferencia del muestreo pasivo, el muestreo activo demanda electricidad para absorber el aire del ambiente y hacerlo pasar a través de un medio físico o químico (INE, s/f). Por otra parte, los monitores automáticos son equipos de análisis en línea y en tiempo real que basan su funcionamiento en el uso de métodos electro ópticos (Ministerio de Ambiente Vivivenda y Desarrollo Territorial, 2010) para medir las propiedades físico químicas de los gases (Cano & Delgado, s/f; Rahmatizadeh & Motesaddi, 2005). En el caso de los sensores remotos, estos equipos utilizan técnicas espectroscópicas de largo recorrido con el objetivo de obtener en tiempo real las mediciones multicomponentes de todos los contaminantes atmosféricos (Dirección General de Salud Ambiental [DIGESA], 2005), sin la necesidad de tomar muestras o entrar en contacto directo con los objetos o eventos observados (Weng, 2010). Para terminar, la técnica de análisis ambiental con bioindicadores consiste en el empleo de seres vivos para identificar los contaminantes que afectan la calidad del ambiente y las condiciones actuales ecosistema (Giacobone & Cabrera, 2009). Particularmente en los países en vías de desarrollo y en zonas remotas, la forma más adecuada y rentable para determinar la contaminación del aire es el uso de hojas de los árboles como bioindicadores (Fasani et al., 2016).

En el Anexo 2 se puede encontrar una explicación más detallada de cada uno de los métodos de medición de contaminantes.

2.4. Material Particulado: Definición y Clasificación

El material particulado, también conocido como partículas suspendidas, aeropartículas o aerosoles, es un conjunto de partículas sólidas y/o líquidas presentes en la atmósfera (Campos et al., 2015) que se caracterizan por su dimensión, estructura y composición química. A pesar de que las partículas suspendidas no tienen una forma esférica, se ha establecido una clasificación de acuerdo al diámetro aerodinámico, que corresponde al diámetro equivalente de una esfera uniforme (Pérez, 2018).

El tamaño del material particulado varía de 0.005 a 100 μm de diámetro aerodinámico (Sbarato & Sbarato, 2006). Según este criterio se clasifican en: partículas ultrafinas ($\text{PM}_{0.1}$), las que tienen un diámetro menor a 0.1 μm ; partículas finas ($\text{PM}_{2.5}$), cuando presentan un diámetro menor a 2.5 μm ; y partículas gruesas (PM_{10}) si el diámetro es menor a 10 μm (Gallego et al., 2012; Sbarato et al., 2000).

2.4.1. Partículas gruesas PM_{10}

2.4.1.1. Origen del PM_{10}

La fracción gruesa de material particulado se origina en partículas primarias, principalmente por fenómenos naturales y también a partir de actividades antrópicas. En ambos casos se presentan procedimientos mecánicos como la resuspensión, abrasión o fricción (Sbarato et al., 2000). Entre las fuentes naturales más importantes destacan las emisiones volcánicas, los incendios, el suelo, el aerosol marino y los residuos biológicos (Menéndez & Gil, 2003). En cuanto a fuentes antrópicas, se tiene las que se derivan del transporte, como las emisiones del tubo de escape, los restos de llantas, frenos o asfalto; y

provenientes de sectores como la construcción, demolición y combustión de carbón y aceite (Rojas & Garibay, 2009).

2.4.1.2. Composición del PM₁₀

La composición química del material particulado está influenciado por dos factores: la fuente de origen y las transformaciones físicas y químicas que se presentan durante su recorrido en suspensión (Galvão et al., 2018). De manera general, el PM₁₀ está formado por 7 componentes químicos: material geológico, sulfatos de amonio, nitratos de amonio, material orgánico, carbón elemental, sales marinas y elementos traza como metales (Canales, Quintero, Castro, & García, 2014).

Los metales y metaloides contenidos en la fracción gruesa producen mucha preocupación (Dos Santos, Gómez, Dawidowski, Gautier, & Smichowski, 2009). Se estima que cerca de un 75 a 90% de metales, como: Cu, Cd, Ni, Zn, y Pb se encuentran en la fracción de PM₁₀. Algunos metales han sido asociados a diversas fuentes: Al, Si, Ti y Ca son típicamente materiales del suelo y la corteza terrestre; Br, Pb, Co y Fe están relacionados con emisiones vehiculares, en tanto que el Mn, Zn y K son principalmente originados en procesos industriales. Elementos mayoritarios, como el Fe y el Zn pueden provenir de la resuspensión del polvo al paso de vehículos y de su combustión en el caso de los vehículos diésel. El Cd, Mn, Pb y Fe son los metales que comúnmente presentan las mayores concentraciones en el aire al lado de las vías (Quijano, Quijano, & Henao, 2010).

2.4.1.3. Efectos del PM₁₀ en la salud

Las propiedades físicas y químicas de los contaminantes atmosféricos, definen su capacidad para producir efectos tóxicos y causar daño en los organismos. En relación con esto, los compuestos que se encuentran en forma de aerosol,

como el material particulado, presentan mayor toxicidad que los que se encuentran en forma gaseosa. Esto se debe a que los gases son eliminados con mayor facilidad del cuerpo, mientras que los aerosoles son absorbidos y se depositan con mayor rapidez (Rosales, Torres, Olaiz, & Borja, 2006).

Particularmente, el PM_{10} , o fracción respirable, es considerado como uno de los contaminantes más importantes y peligrosos de las áreas urbanas, ya que se ha comprobado su gran capacidad de acceso a través de las vías respiratorias hasta introducirse profundamente en los alveolos pulmonares (López et al., 2011). Como consecuencia, este contaminante influye en la aparición y gravedad de afecciones respiratorias, cardiovasculares y neurológicas (Cevallos et al., 2017).

Lo cierto es que no se ha podido establecer un límite de concentración de material particulado por debajo del cual no se hayan percibido efectos perjudiciales. Por el contrario, se ha comprobado que existe una estrecha relación entre la exposición a altas concentraciones de este contaminante y el aumento de la mortalidad y morbilidad (OMS, 2018), y que, incluso, cuando se alcanzan valores muy bajos, considerados tolerables, se presentan efectos negativos en la salud (Silva et al., 2017).

2.4.1.4. Marco legal y límites máximos permisibles del PM_{10}

A nivel mundial, además de los reglamentos internos en cuanto a calidad del aire, se toman en consideración normas técnicas creadas por los organismos internacionales encargados de la gestión de la salud y el medio ambiente. Estos instrumentos normativos tienen como objetivo el control y prevención de la contaminación atmosférica producida principalmente por los contaminantes que pertenecen al grupo crítico o criterio, dentro del cual se encuentra el material particulado.

En Ecuador, uno de los avances más destacados de los últimos años, en cuanto a prevención y control de la contaminación del aire, es la

implementación de la Norma Ecuatoriana de Calidad del Aire (NECA). Esta norma establece los objetivos de calidad del aire, proporciona los límites máximos permisibles para contaminantes criterio y provee los procedimientos para determinar la concentración de estos compuestos (Manosalvas, 2017). Ante la presencia de graves escenarios de contaminación del aire, la NECA ha dispuesto tres niveles de concentración de contaminantes: alerta, alarma y emergencia, cuya ocurrencia determinará la ejecución de actividades específicas. Para el caso del material particulado PM_{10} , en un período de 24 horas, se establece que el nivel de alerta es de $250 \mu\text{g}/\text{m}^3$, el de alarma es de $400 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y el de emergencia es de $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Texto Unificado de Legislación Secundaria de Medio Ambiente [TULSMA], s/f).

Como se puede observar en la Tabla 1, en nuestro país, los límites máximos permisibles para PM_{10} son menos estrictos que otros valores establecidos por organismos internacionales para promedios diarios y anuales.

Tabla 1.

Límites máximos permisibles para PM_{10} en Ecuador y según algunos organismos internacionales

Instrumento normativo	Media anual ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Media diaria ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Norma de Calidad del Aire Ambiente o Nivel de Inmisión del Ecuador ^a	50	100
Guía de calidad del aire de la OMS ^b	20	50
Norma Europea de calidad del aire ^c	40	50
U.S. Environmental Protection Agency (USEPA) ^d	-	150

Adaptado de

^a (TULSMA, s/f)

^b (OMS, 2005)

^c (Agencia Europea de Medio Ambiente [AEMA], 2013)

^d (USEPA, 2019)

De acuerdo con el informe de la calidad de aire del DMQ del año 2016, existen muy pocos casos en los que los contaminantes superan la norma ecuatoriana a corto plazo. Sin embargo, las infracciones a largo plazo para el material particulado son constantes. De hecho, la capital del Ecuador muestra un promedio anual de PM_{10} en suspensión de $38 \mu\text{g}/\text{m}^3$, lo cual la posiciona como la segunda ciudad con mayor índice de este contaminante en el país, debajo de Santo Domingo (OMS, 2014). Los habitantes más expuestos a concentraciones elevadas de PM_{10} en el DMQ son los que viven en el sector de Guamaní y San Antonio de Pichincha (Secretaría de Ambiente, 2017).

2.4.1.5. Método para recolección de PM_{10} – Muestreador de alto volumen

El Muestreador de alto volumen, también conocido como Hi-Vol, por sus siglas en inglés, es uno de los instrumentos más ampliamente utilizados para cuantificar y recoger el PM. Generalmente, forma parte de una estación de monitoreo de la calidad del aire. Este equipo trabaja por un período de tiempo determinado (24 horas), captando una cantidad medible de aire (Centro Lasallista de Investigación y Modelación Ambiental [CLIMA], 2017), a una velocidad de flujo constante por medio de su sistema de bombeo hacia el interior de la caja de muestreo donde se ubica un filtro (Figura 1) (Amaya, Martínez, & Rizzo, 2008). Este método no destruye la muestra, por lo que permite la ejecución de futuros análisis. Cabe mencionar que no existe un único tipo de material filtrante, la selección del mismo depende de la existencia de incompatibilidades con el contenido filtrado, que pueden generar resultados incongruentes. Para el análisis elemental del material particulado recolectado se recomienda utilizar cuarzo o fibra de vidrio (Galvão et al., 2018).



Figura 1. Muestreador de alto volumen para PM₁₀

Tomado de (Arcínegas, 2012)

2.5. Plantas como bioindicadores

En los últimos años, las actividades antrópicas, y en especial el uso de combustibles fósiles, han provocado niveles alarmantes de contaminación del aire, que afectan a todos los seres vivos, pero principalmente a las plantas que están sometidas a una exposición constante. Por este motivo, las especies vegetales son consideradas como los mejores bioindicadores de la calidad atmosférica (Turkyilmaz, Sevik, & Cetin, 2018). En la bioindicación, los árboles son preferidos por encima de otras especies como los hongos, algas y líquenes, no necesariamente porque son mejores, sino debido a que se plantan en urbes y tiene mayor tiempo de vida, por lo cual pueden brindar más información acerca de los efectos de la contaminación (Sawidis, Breuste, Mitrovic, Pavlovic, & Tsigaridas, 2011).

La capacidad de acumulación que poseen las plantas, constituye una herramienta favorable en casos de biorremediación y biomonitoreo, donde los metales absorbidos por las plantas normalmente se correlacionan con la exposición al ambiente. Puesto que la forma química de estos elementos define la biodisponibilidad y la toxicidad, son necesarios los estudios de especiación (Kroukamp, Wondimu, & Forbes, 2016). En el caso de los metales pesados y metaloides, la acumulación se evidencia principalmente en las raíces, aunque

en algunas especies se observa en las hojas y en los troncos (Turkyilmaz et al., 2018). Se ha comprobado que la forma más directa en la que las plantas pueden absorber metales pesados del aire es por medio de los estomas o por deposición en las superficies del follaje (Sun et al., 2010). Por otra parte, uno de los requisitos más importantes, es que la absorción de contaminantes por parte de las plantas debe depender de otros factores que no sean del metal en estudio (Čeburnis & Steinnes, 2000).

2.5.1. Uso de coníferas como biomonitores de metales en el aire

Se denomina coníferas, pinophyta o coniferophyta, al grupo de plantas pertenecientes a las gimnospermas (Farjon & Filer, 2012), que abarcan a todos los árboles y arbustos con hojas simples y estructuras fértiles dispuestas en conos polínicos simples y ovulados, en su mayoría con corteza áspera y gruesa (Gernandt & Pérez, 2014). Generalmente, estas plantas presentan los sexos masculino y femenino en el mismo individuo y las semillas que producen carecen de una envoltura o fruto carnoso que las proteja, como se muestra en la Figura 2 (Manzanilla, Aguirre, & Jiménez, 2018).

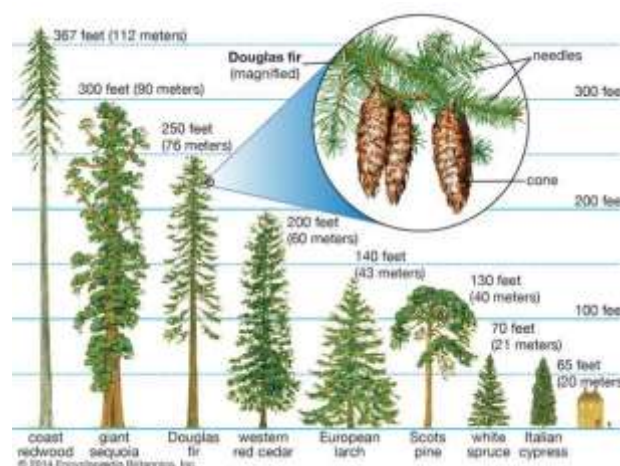


Figura 2. Ejemplos de coníferas y sus diferentes alturas.

Tomado de (Eckenwalder, 2018)

Actualmente, las plantas pertenecientes al grupo de las coníferas son muy utilizadas en el campo del biomonitorio ya que presentan muchos aspectos positivos. Así, por ejemplo, varios trabajos han demostrado que el uso de agujas de coníferas en el biomonitorio de las concentraciones de metales es un método efectivo debido a que son especies de hoja perenne que permanecen en los árboles durante un período de tiempo más prolongado (Fasani et al., 2016; Tomashuk, Truong, Mantha, & McGowin, 2012). Además, este grupo posee una capa cerosa epicuticular (Sun et al., 2010) y canales de resina complementarios que posibilitan la absorción de metales y mayor efectividad en la acumulación de compuestos en relación con las especies de hoja ancha. En las hojas de las coníferas, la concentración de metales traza, está influenciada por fuentes no puntuales como el tráfico; en cambio, la acumulación de estos elementos se puede ver significativamente afectada por las fuentes externas como el polvo del suelo (Brown, Luu, & O'Sullivan, 2017).

2.5.2. *Araucaria heterophylla*

La *Araucaria heterophylla*, también conocida como *araucaria excelsa* o pino de la isla Norfolk, es una especie vegetal perteneciente a la familia *Araucariaceae*, cuya clasificación botánica se detalla en la Tabla 2.

Tabla 2.

Clasificación botánica de la Araucaria heterophylla

Dominio	Eukaryota
Reino	Plantae
División	Pinophyta

Clase	Pinopsida
Orden	Pinales
Familia	Araucariaceae
Género	Araucaria
Especie	A. heterophylla

Adaptado de (Patil, Darekar, & Saudagar, 2013).

2.5.2.1. Descripción

Esta especie es una conífera de hoja perenne (Gul, Khattak, & Amin, 2006), que tiene forma piramidal y llega a medir hasta 1.75 m de diámetro. La altura máxima que alcanza esta especie en su medio natural es 60 m, mientras que en zonas urbanas aproximadamente 30 m, dependiendo de la elevación de cada lugar (Municipio del Distrito Metropolitano de Quito, 2014b). El tronco del árbol es recto de color grisáceo, varias ramificaciones primarias están conectadas a esta estructura, dando lugar a verticilos dispuestos en pisos. Sobre las ramificaciones primarias se encuentran otras más pequeñas o secundarias ubicadas en todas las direcciones, que están compuestas por hojas imbricadas y arqueadas en el ápice. Las hojas juveniles son colgantes, y poseen un color verde brillante; las adultas están erguidas formando un cilindro largo y flexible (Figura 3) (López, 2004).



Figura 3. Araucaria heterophylla

Los pinos de la isla Norfolk son dioicos, es decir, que existen individuos femeninos y masculinos. Los conos masculinos son alargados, de 3-5 cm de longitud y son de color pardo amarillento o rojizo; los conos femeninos son ovoides o globosos, más anchos en la base, con dimensiones de 7.5-12 cm x 9-16 cm respectivamente. Las semillas tienen forma alada con 3-6 mm de longitud, lo que permite su fácil reproducción (Guillot, 2012).

2.5.2.2. Distribución natural y adaptación

Se originó en Oceanía, específicamente en la isla australiana de Norfolk, localizada al este del país (López, 2004). A partir de su descubrimiento en el año 1774, la especie se ha extendido por todo el mundo gracias a su apariencia agradable, carácter decorativo y su amplia capacidad de adaptación climática (Darge, 2017). Incluso, existen reportes de que se ha naturalizado en algunos lugares como Queensland y Hawai (Francis, s/f). La araucaria es muy resistente a plagas y soporta moderadamente la contaminación urbana (Municipio del Distrito Metropolitano de Quito, 2014).

2.5.2.3. Usos

Los miembros del género *Araucaria* contienen una gran cantidad de aceites esenciales. Estas sustancias vegetales comprenden varias actividades biológicas con potencial uso en el campo de la medicina, entre las actividades tenemos: antipirética, antinociceptiva, antiinflamatoria, anticoagulante, ulceprotectora y analgésica (Michael, Awad, El-Sayed, & Paré, 2010).

La principal aplicación de esta especie es como árbol de ornamento, ya que se considera atractiva por su gran altura, bella forma y armónica disposición de ramas. En mayor proporción se plantan en solitario, adornando ambientes externos como calles, parques o jardines privados; y también en el interior de edificaciones sobre macetas. Cabe mencionar que no es recomendable su ubicación en lugares con poco espacio, como patios o terrazas, ya que cuentan con raíces superficiales grandes y además crecen verticalmente muy rápido (Gilman et al., 2018). Por otro lado, el tronco de las especies maduras se puede emplear en la obtención de madera. El material obtenido se considera un poco frágil comparado con otros, debido a que presenta resistencia moderada al doblado y a la compresión, por lo que puede perder valor en usos tradicionales (Francis, s/f).

2.6. Análisis de metales - Espectrometría de emisión óptica de plasma

Las técnicas más implementadas para análisis de metales de una muestra son las que se fundamentan en espectrometría atómica, aunque también, existen otras alternativas muy conocidas como rayos X y análisis de activación (Galvão et al., 2018). La finalidad de estas técnicas es conocer todas las especies de metales presentes en la muestra. Sin embargo, también se puede implementar esta información para identificar las fuentes y deducir el origen.

Dentro de la espectrometría atómica, las metodologías más empleadas son las que se basan en plasma acoplado inductivamente (ICP), en el cual se ioniza la muestra con argón para excitar los electrones hasta superar su estado estable.

El ICP demanda la digestión ácida de la totalidad de la muestra y, por ello, se considera un proceso destructivo. Se conocen dos variantes de esta técnica que difieren en el principio y la detección, estos son: espectrometría de masas (MS) y espectrometría de emisión óptica (OES) (Galvão et al., 2018).

El ICP-OES es el método utilizado en el presente trabajo, el cual es de carácter multielemental, y posee una elevada susceptibilidad y acertada capacidad de detección. Después de aplicar un proceso de dilución apropiado, se puede implementar en distintas matrices y se caracteriza por rangos de concentración dinámicos extendidos (Smichowski et al., 2004).

3. CAPÍTULO 3: Metodología

A continuación, se describe el área de estudio, el procedimiento de muestreo y la parte experimental, así como también los métodos estadísticos utilizados en el presente trabajo. Todos los análisis químicos realizados fueron llevados a cabo en los laboratorios de investigación de la UDLA. Dichos análisis fueron financiados con los proyectos de investigación “Chemical composition of PM pollution in high elevation urban area, a case study of Quito, Ecuador” y “Detection and quantification of the metals and the Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) accumulated in a bioindicador foliage at urban areas of Quito, Ecuador” de la UDLA.

3.1. Área de estudio

El Distrito Metropolitano de Quito, está ubicado dentro de la provincia de Pichincha, al norte de la Sierra ecuatoriana. Políticamente está conformado por 32 parroquias urbanas y 33 rurales, agrupadas en 8 administraciones zonales (Municipio del Distrito Metropolitano de Quito, 2014a). En este estudio, se seleccionaron tres sitios de recolección de muestras distribuidos en toda el

área del DMQ: Belisario (B), Los Chillos (C) y Tababela (T) (Figura 4). Se escogieron estos tres puntos ya que forman parte de la Red Metropolitana de Monitoreo Atmosférico de Quito, la cual está conformada por cuatro subsistemas. Las estaciones Belisario y Los Chillos se integran en el subsistema Red Automática (RAUTO), que está conformado por ocho estaciones fijas en cada una de las administraciones zonales. La estación Tababela, pertenece al subsistema Red de Depósito (REDEP), que está conformado por 35 puntos de monitoreo en todo el distrito (Díaz, López, Pallango, Chávez, & Guerrón, 2011) . En la Tabla 3 se muestra la ubicación, las coordenadas, la elevación, la descripción y el uso de suelo, en un radio de 1 km, de cada una de estas estaciones.

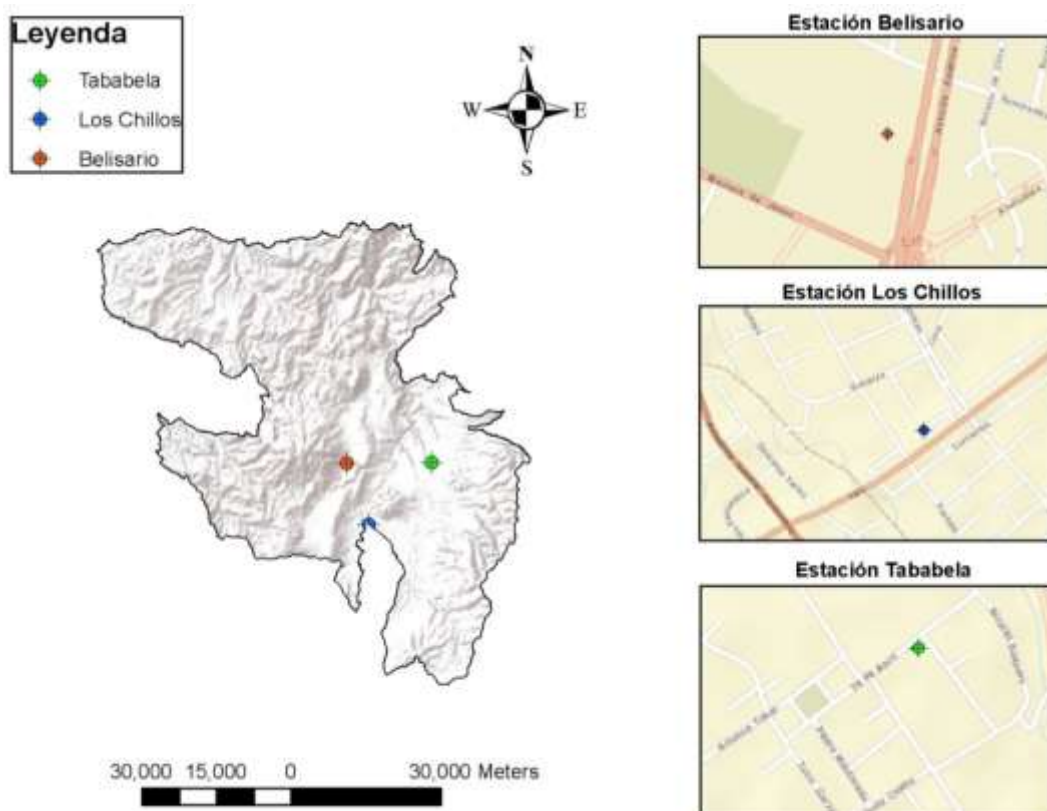


Figura 4. Ubicación de los sitios de recolección de muestras

Tabla 3.

Información de las estaciones de monitoreo de PM₁₀ seleccionadas para el estudio

Estación de monitoreo	Ubicación	Coordenadas ^a	Elevación (m.s.n.m.) ^a	Descripción del lugar ^b	Uso de suelo ^c
Belisario	Colegio San Gabriel	0°11'04.7"S 78°29'45.1" W	2835	Zona urbana consolidada, con alto tráfico vehicular	Múltiple, equipamiento, área de promoción, residencial urbano 3.
Los Chillos	Agencia San Rafael CNT	0°17'48.8"S 78°27'19.5" W	2453	Zona urbana influenciada por la industria, con mayor afluencia vehicular en el lugar de emplazamiento de la estación	Múltiple, equipamiento, protección ecológica / conservación del patrimonio natural, residencial urbano 1 y 2.
Tababela	Colegio Arturo Freire	0°11'03.0"S 78°20'34.3" W	2331	Zona rural con actividad agrícola, influenciada desde hace pocos años por la presencia del Aeropuerto Mariscal Sucre	Equipamiento, protección ecológica / conservación del patrimonio natural, producción sostenible, agrícola residencial, residencial urbano 1, residencial rural 2, industrial 2.

^a(Secretaría de Ambiente, s.f.)

^b(Cevallos et al., 2017)

^c(Secretaría de Territorio Hábitat y Vivienda, s.f.)

3.2. Muestreo

3.2.1. Recolección de muestras de PM₁₀

En este trabajo, se analizaron los filtros de las tres estaciones de monitoreo en estudio, que fueron obtenidos en condiciones reales de presión y temperatura. El período de recolección de las muestras comprendió los años 2017 y 2018, donde se tomaron 2 muestras por cada mes. Durante el primer año, en todas las estaciones, se utilizaron las muestras tomadas en los meses de enero a octubre; y en el segundo año se emplearon las muestras de todos los meses (de enero a diciembre), con excepción de la estación Tababela donde no se pudieron obtener las mediciones de agosto, septiembre, octubre y, en los meses de julio y noviembre, sólo se hizo una recolección. Así, el total de muestras analizadas de PM₁₀ fue 124.

Las muestras de PM₁₀ fueron recolectadas en filtros de fibra de cuarzo (25.4 cm x 20.3 cm) que se encontraban dentro de los muestreadores de alto volumen (Tisch Environmental, Inc.), ubicados a una altura aproximada de 10 m del nivel del piso, en las terrazas de los edificios donde están instaladas las estaciones de monitoreo (Figura 5). Luego del muestreo, los filtros se almacenaron en bolsas con cierre hermético, y se mantuvieron en refrigeración hasta que se efectuaron los análisis químicos.



Figura 5. Muestreador de alto volumen

3.2.2. Recolección de muestras de hojas de la *Araucaria heterophylla*

En cada sitio de estudio se identificó una *Araucaria heterophylla*, a una distancia máxima de 260 m en línea recta de la estación de monitoreo (Tabla 4, Figura 4). Es preciso mencionar que todos los árboles de donde se tomaron las muestras, fueron identificados por Diana Fernández, investigadora del Instituto Nacional de Biodiversidad (INABIO). El informe de identificación taxonómica de las 3 especies se encuentra en el Anexo 3.

La recogida de las hojas fue hecha en los diferente puntos cardinales (norte, sur, este, oeste) de la planta (Sun et al., 2010) y, aproximadamente, a 2.5 m de altura del suelo, con el objetivo de obtener una muestra más homogénea (Figura 6).

En total, se efectuaron tres muestreos en diferentes meses (agosto, septiembre y noviembre), del año 2019, por cada una de las estaciones. Así, el total de muestras de hojas recogidas fue 9. Una vez recogidas las muestras, éstas fueron colocadas en bolsas de cierre hermético y envueltas en papel aluminio. De seguida, fueron colocadas dentro de un cooler mediano, en cuyo interior se distribuyeron bolsas de gel refrigerante. Al llegar al laboratorio, se congelaron las muestras a -20°C hasta el proceso de análisis, en donde se descongelaron dentro de un desecador (Kroukamp et al., 2016).

Además de las muestras recogidas en los árboles de *Araucaria heterophylla* encontrados cerca de cada estación, se recogió una muestra en una zona con un grado bajo de afectación antrópica, la cual fue considerada como blanco. La muestra fue tomada igualmente en el DMQ, específicamente dentro de la Hacienda el Refugio (0°20'15.1"S 78°23'49.4"W) ubicada en la parroquia Pintag y siguiendo el mismo procedimiento que con las muestras anteriores.

Tabla 4.

Información de los puntos de muestreo de las hojas de Araucaria heterophylla

Estación de monitoreo más cercana	Coordenada del punto de muestreo	Distancia a la estación de monitoreo (m)
Belisario	0°11'06.0"S 78°29'42.8"W	71
Los Chillos	0°17'58.0"S 78°27'17.7"W	259
Tababela	0°11'01.3"S 78°20'26.6"W	239

3.3. Procedimiento experimental

3.3.1. Material particulado PM₁₀

3.3.1.1. Acondicionamiento de los filtros

Los técnicos de la Secretaría del Ambiente realizaron el acondicionamiento y pesaje de los filtros de fibra de cuarzo, tanto antes como después de cada muestreo. El acondicionamiento fue llevado a cabo durante 48 horas en condiciones constantes de temperatura (20°C) y humedad relativa (50%).

3.3.1.2. Recolección y pesaje del material particulado PM₁₀ en los filtros

Una vez acondicionados, los filtros fueron pesados cinco veces consecutivas en una microbalanza de sensibilidad de 0,01 mg (Radwag) (Ramírez et al., 2018). Posteriormente, fueron reubicados dentro de los muestreadores de alto volumen para que recolecten el material particulado durante 24 horas.

Transcurrido ese tiempo, los filtros fueron extraídos del equipo. De seguida, fueron acondicionados, y posteriormente, pesados en la microbalanza. Finalmente, se determinó la masa de PM₁₀ recolectada por gravimetría, es decir, calculando la diferencia entre el peso del filtro antes y después de la recolección.

3.3.1.3. Extracción de elementos químicos del material particulado PM₁₀

Para la extracción de elementos químicos del material particulado PM₁₀, se recortó una tira (6.35 cm x 2.5 cm) del filtro extraído del muestreador de alto volumen. La tira de filtro fue digerida con 10 ml de ácido nítrico (65 %m/m) en el sistema de digestión por microondas (MARS 6 - CEM Corporation), a una temperatura de 200°C por 45 minutos. La solución del extracto se filtró y se completó un volumen de 50 ml con agua ultrapura.

Además, con el fin de verificar la calidad del método de análisis, se determinó el porcentaje de recuperación de los metales. De esta manera, se colocó 0,1 g de material de referencia (Urban Particulate Matter, NIST SR; M 1648a) sobre una tira de filtro sin usar (6.35 cm x 2.5 cm) y se sometió al mismo proceso de digestión que para las muestras. Los valores porcentuales de recuperación de los metales se detallan en la Tabla 5.

Cabe mencionar que, en la muestra, además de algunos metales (Al, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ni, Pb, Sr, V, y Zn) también se cuantificó el no metal Azufre (S).

Tabla 5.

Porcentaje de recuperación de los elementos químicos usando el material de referencia Urban Particulate Matter, NIST SR; M 1648a

Elemento	% de recuperación
Al	94.50
Ca	85.61
Cd	103.83
Cr	101.28
Cu	95.54
Fe	87.66
K	94.48
Mg	90.65
Mn	95.85
Na	106.51
Ni	91.66
Pb	100.38
S	96.20
Sr	85.68
V	86.15
Zn	91.65

3.3.2. Hojas de *Araucaria heterophylla*

3.3.2.1. Determinación de la humedad de hojas de *Araucaria heterophylla*

La tarde previa al día de la determinación de la humedad del material vegetal, se acondicionaron los crisoles conforme al número de muestras con las que se

iba a trabajar. La determinación de la humedad fue realizada a la par con el análisis químico en cada mes de estudio y por triplicado.

El acondicionamiento de los crisoles consistió en dejar los recipientes durante toda la noche dentro de la estufa a una temperatura constante de 75°C. Por la mañana, se trasladaron los crisoles al desecador, por aproximadamente 25 minutos, hasta que se enfríen. A la par del enfriamiento, se tomaron pequeñas porciones de las muestras congeladas de material vegetal, en cantidad suficiente para realizar las tres repeticiones de cada zona de estudio, y se dejaron en el desecador por 1 hora. Transcurrido el tiempo, se pesó cada crisol vacío y seguidamente se colocó 2.5 g de la muestra vegetal previamente aclimatada. Para confirmar la veracidad de los pesos obtenidos, se pesó el crisol más la muestra y se comparó con la sumatoria de los valores individuales (crisol vacío + muestra).

La eliminación de la humedad consistió en introducir en la estufa los crisoles con la muestra vegetal, en períodos de tiempo de algunas horas y finalmente registrar los nuevos pesos. El proceso se repitió varias veces, hasta verificar, con los resultados anteriores, que se alcanzó un peso constante.

3.3.2.2. Extracción de elementos químicos de las hojas de *Araucaria heterophylla*

Para la extracción de los metales contenidos en la muestra vegetal, se dispusieron de 12 vasos de precipitación; 9 para pesar, por triplicado, las muestras de cada lugar de estudio y los 3 restantes para analizar, por triplicado, el material de referencia de hoja de pinos (Trace Elements in Pine Needles of *Pinus taeda*, NIST SR; M 1575a). Todos los recipientes se pesaron, individualmente, en una balanza analítica, y se tararon para pesar 0,5 g de material vegetal acondicionado, o material de referencia. El pesaje de las muestras se realizó cortando, aleatoriamente, pequeños pedazos de hojas de

aproximadamente 1 cm de largo hasta completar la cantidad especificada, con el fin de obtener un resultado más homogéneo.

A cada una de las muestras y material de referencia, se añadió 7 ml de ácido nítrico (67%*m/m*), 2 ml de peróxido de hidrógeno (30%*m/m*) y 1 ml de agua ultrapura. Posteriormente, todas las muestras se sometieron a 200°C durante 45 minutos, utilizando el sistema de digestión por microondas (MARS 6 - CEM Corporation). Concluida la digestión, se filtró el producto y se añadió el volumen necesario de agua destilada para completar 25 ml en los matraces aforados. Los valores porcentuales de recuperación del material de referencia se detallan en la Tabla 6.

Tabla 6.

Porcentaje de recuperación de los elementos químicos usando el material de referencia Trace Elements in Pine Needles of Pinus taeda, NIST SR; M 1575a

Elemento	% de recuperación
Al	77.72
Ba	82.70
Ca	88.02
Co	43.41
Cr	86.40
Cu	91.14
Fe	79.40
K	78.89
Mg	83.90
Mn	111.01
Pb	53.77
Zn	82.74

3.4. Análisis de elementos químicos en las muestras de PM₁₀ y *Araucaria heterophylla*

El método escogido para identificar y cuantificar los elementos químicos, tanto en el material particulado como en las hojas, es la Espectroscopía de Emisión Óptica por Plasma de Acoplamiento Inductivo (ICP-OES), que se utiliza para medir la concentración de una variedad de elementos en matrices de muestra. El equipo disponible en la UDLA (ICP-OES, Thermo Scientific iCAP 7000 Series) es capaz de cuantificar las concentraciones de varios elementos (B, Ba, Bi, Cd, Co, Cr, Cu, K, Mn, Ni, Pb, Sr, Ti, Zn, Ca, Fe, Al, Na, Li, Ag, Ga, Mg, V, Te, Se, S, P, Si, As, Be), gracias a una calibración externa elaborada usando estándares.

Cada muestra digerida se colocó dentro de tubos dispuestos sobre una gradilla, de donde el muestreador del equipo toma la solución a través de unas mangueras, que la conducen hasta la cámara de nebulización e inmediatamente al interior en forma de pequeñas partículas (Figura 7). Una vez dentro del equipo, los analitos son excitados por plasma de alta temperatura generándose los espectros de emisión atómicos que son medidos por el detector. Después de cada análisis, se lavó todo y se alineó la antorcha con una solución de 2 ppm de zinc para que emita una curva adecuada.

El proceso experimental del análisis de elementos químicos en las muestras de PM₁₀ y *Araucaria heterophylla* se encuentra resumido en la Figura 8.

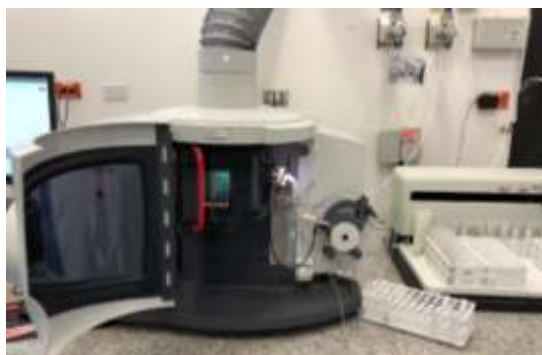


Figura 6. Procedimiento de análisis del ICP-OES

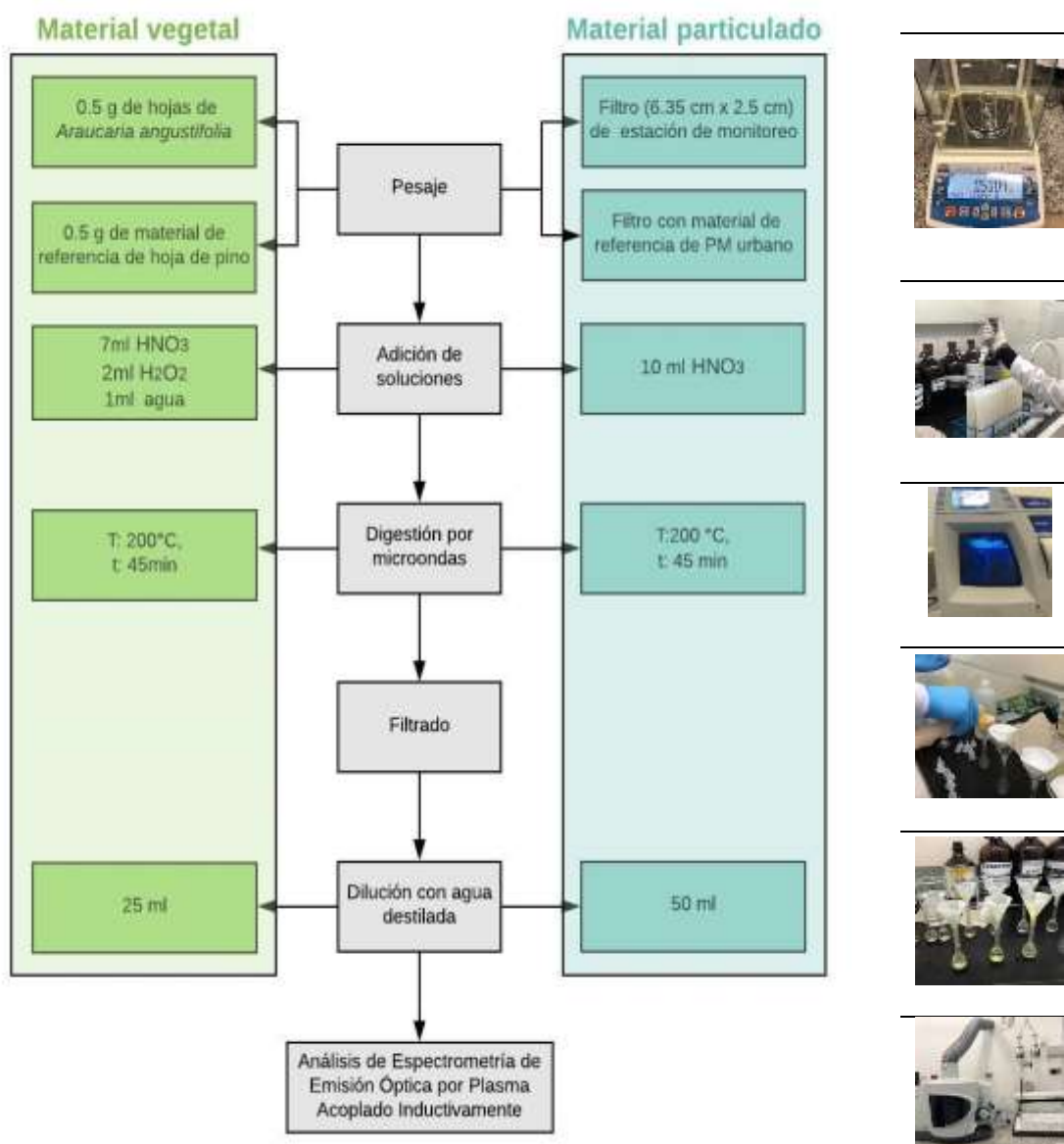


Figura 7. Esquema del procedimiento experimental para la extracción y análisis de elementos químicos del material particulado PM₁₀ y material vegetal

3.5. Tratamiento de datos

3.5.1. Material particulado PM₁₀

Como primer paso para determinar la concentración másica de PM₁₀ y de los elementos químicos recolectados en el filtro, se ajustó el volumen de aire a la

entrada del muestreador de alto volumen a condiciones estándar ambientales de presión y temperatura. Para ello, se empleó la Ecuación 1 (USEPA, 1999).

$$V_{\text{std}} = V_s \times \frac{T_{\text{std}}}{T_m} \times \frac{P_{\text{bar}}}{P_{\text{std}}}$$

(Ecuación 1)

Donde:

- V_{std} : volumen de aire ambiente muestreado en condiciones de referencia EPA (std m³)
- V_s : volumen de aire ambiente que ingresa a través del muestreador (m³)
- T_{std} : temperatura absoluta de referencia EPA (298 K)
- T_m : temperatura ambiente promedio (K)
- P_{bar} : presión barométrica durante la condición de medición de muestreo (mmHg)
- P_{std} : presión barométrica de referencia EPA (760 mmHg)

De esta manera, se determinó la concentración de PM₁₀ usando la Ecuación 2.

$$PM_{10} = \frac{(W_f - W_i) \times 10^6}{V_{\text{std}}}$$

(Ecuación 2)

Donde:

- PM_{10} : concentración másica del material particulado PM₁₀ (μg PM₁₀/std m³)
- W_f : peso final del filtro usado (g)
- W_i : peso inicial del filtro limpio (g)
- V_{std} : volumen de la muestra de aire, en condiciones estándares (std m³)
- 10^6 : conversión de g a μg

Por otro lado, la concentración másica de los elementos químicos fue determinada usando la Ecuación 3.

$$C_{EQ2PM10} \left(\frac{\mu\text{g}}{\text{std m}^3} \right) = \frac{C_{EQ1PM10} \left(\frac{\text{mg}}{\text{kg}} \right) \times P_{\text{muestra}} (\text{kg}) \times A_f \times 10^3}{V_{\text{std}}}$$

(Ecuación 3)

Donde:

- $C_{EQ1PM10}$: concentración del elemento químico en el PM_{10} , proporcionada por el análisis en el ICP-OES (mg/kg)
- $C_{EQ2PM10}$: concentración calculada del elemento químico en el PM_{10} (μg elemento/std m^3)
- P_{muestra} : peso de la tira de filtro analizada (kg)
- A_f : fracción de áreas (área del filtro entero (20.3 cm x 25.4 cm) / área de la tira de filtro analizada (2.5 cm x 6.35 cm)) = 32.54 cm^2
- V_{std} : volumen de la muestra de aire, en condiciones estándares (std m^3)
- 10^3 : conversión de mg a μg

Cabe mencionar que, en la Ecuación 3, se multiplica por el peso de la muestra (P_{muestra}) ya que las unidades de concentración del equipo estaban en mg/kg. En caso de que las concentraciones de los elementos estén en mg/L, se debe multiplicar por el volumen final de la solución para el análisis en el ICP-OES (50 ml, ver apartado 3.3.1.3) en vez del peso de la muestra.

3.5.2. Hojas de *Araucaria heterophylla*

Los datos proporcionados por el servicio técnico, sobre las concentraciones de los elementos químicos en la muestra vegetal, fueron en mg/L. Así, la concentración de los elementos químicos, en mg/kg, fue determinada a través de la Ecuación 4.

$$C_{EQ2MV}\left(\frac{\text{mg}}{\text{kg}}\right) = C_{EQ1MV}\left(\frac{\text{mg}}{\text{L}}\right) \times \frac{V_f}{P_{\text{muestra}}} \times \frac{10^3}{10^3}$$

(Ecuación 4)

Donde:

- C_{EQ1MV} : concentración del elemento químico en el material vegetal, proporcionada por el análisis en el ICP-OES (mg/L)
- C_{EQ2MV} : concentración calculada del elemento químico en el material vegetal (mg elemento/kg de muestra)
- V_f : volumen final de dilución para el análisis en el ICP-OES (25 ml)
- P_{muestra} : peso de la muestra de material vegetal (g)
- 10^3 : conversión de g a kg
- 10^{-3} : conversión de mL a L

Las concentraciones de los elementos, en unidades mg/kg, fueron utilizadas para comparar las concentraciones obtenidas de los elementos en el PM_{10} .

Posteriormente, y con el objeto de contrarrestar la diferencia de contenido de agua en el material vegetal en los diferentes lugares y en los diferentes meses, se determinó la concentración mg/kg en base seca. Para ello, se calculó el porcentaje de humedad de la muestra con la Ecuación 5 (López, Sarmiento, Fajardo, Valarezo, & Zuluaga, 2013).

$$\%H = \left(\frac{P_h - P_s}{P_h}\right) \times 100$$

(Ecuación 5)

Donde

- %H: porcentaje de humedad en la muestra (%)
- P_h : peso de la muestra húmeda (g)
- P_s : peso de la muestra seca (g)

Así, para determinar la concentración en base seca, se aplicó la Ecuación 6.

$$C_{EQbs}(\mu\text{g/g b. s.}) = \left(\frac{C_{EQ2MV}}{100 - \%H} \right) \times 100$$

(Ecuación 6)

Donde:

- C_{EQbs} : concentración del elemento químico en el material vegetal en base seca (μg elemento/g en base seca)
- C_{EQ2MV} : concentración del elemento químico en el material vegetal (mg elemento/kg de muestra)
- $\%H$: porcentaje de humedad en la muestra (%)

3.6. Métodos estadísticos

Para el análisis estadístico de los resultados, se utilizaron dos herramientas del software RStudio: el Análisis de Varianza (ANOVA), y el Análisis de Componentes Principales (PCA).

El ANOVA se empleó para determinar si existen diferencias estadísticamente significativas en las concentraciones obtenidas. Esta herramienta compara la variabilidad de las medias muestrales con la variabilidad de los elementos dentro de la muestra (Ruiz, 2009). Para el caso de los filtros, se analizaron los resultados dentro de la misma estación (variación entre los años) y entre estaciones (variación entre las estaciones). Para las plantas, solamente se realizó el análisis entre estaciones. Finalmente, para comparar ambas matrices (filtros y hojas de plantas) el análisis fue hecho entre estaciones, durante los meses de agosto, septiembre y noviembre.

Por su parte, en el PCA se utilizaron los datos de concentración de los elementos químicos del material particulado para identificar las fuentes de emisión según como se agrupan los diferentes metales. Esta técnica estadística transforma un conjunto de datos en un nuevo grupo (componentes)

cuyas variables se encuentran correlacionadas entre sí y ordenados de acuerdo con la información que llevan incorporada (Fernández, 2011).

4. CAPÍTULO 4: Resultados y Discusión

4.1. Concentración de elementos químicos en los filtros de material particulado PM₁₀

La Tabla 7 muestra el promedio de la concentración de PM₁₀ y de los elementos químicos para cada año y para cada estación estudiada. Adicionalmente, en el Anexo 4 se incluyen los resultados de las 2 muestras mensuales obtenidas del análisis en el ICP-OES durante todo el período de muestreo.

Como se puede observar, en todas las estaciones, se registraron concentraciones promedio de PM₁₀ más altas en el 2017 que en el 2018. En ambos años se supera la media anual establecida por la OMS como límite máximo permisible (20 µg/m³). Sin embargo, estos valores se encuentran por debajo de la media anual establecida por las Normas para Calidad del aire en Ecuador (50 µg/m³) y en Europa (40 µg/m³) (Figura 9).

Tabla 7.

Promedio de concentración de PM₁₀ y de elementos químicos (µg/m³) en las estaciones de monitoreo durante el 2017 y 2018

Elemento	Belisario			Chillos			Tababela		
	2017	2018	Promedio	2017	2018	Promedio	2017	2018	Promedio
PM ₁₀	27.33 ± 8.64	25.10 ± 8.94	26.21 ± 8.79	27.86 ±11.05	25.17 ± 10.69	26.51 ± 10.87	27.81 ± 14.94	26.59 ± 12.57	27.20 ± 13.76
Cd	0.0029 ± 0.0035	0.062 ± 0.072	0.033 ± 0.038	0.0015 ± 0.0018	0.038 ± 0.047	0.020 ± 0.024	0.0021 ± 0.0023	0.037 ± 0.053	0.020 ± 0.028
Cr	0.095 ± 0.26	0.0087 ± 0.0027	0.052 ± 0.13	0.0093 ± 0.0087	0.0085 ± 0.0057	0.0089 ± 0.0072	0.023 ± 0.033	0.0091 ± 0.0064	0.016 ± 0.020
Cu	0.098 ± 0.088	0.098 ± 0.074	0.098 ± 0.081	0.20 ± 0.21	0.088 ± 0.047	0.14 ± 0.13	0.054 ± 0.038	0.065 ± 0.024	0.059 ± 0.031
K	0.73 ± 0.80	0.76 ± 0.26	0.74 ± 0.53	0.41 ± 0.19	0.82 ± 0.32	0.61 ± 0.25	0.39 ± 0.10	0.83 ± 0.25	0.61 ± 0.18
Mn	0.042 ± 0.015	0.055 ± 0.017	0.048 ± 0.016	0.032 ± 0.013	0.056 ± 0.017	0.044 ± 0.015	0.031 ± 0.013	0.061 ± 0.022	0.046 ± 0.018
Ni	0.015 ± 0.034	0.014 ± 0.011	0.015 ± 0.022	0.0077 ± 0.0075	0.015 ± 0.012	0.012 ± 0.0096	0.0030 ± 0.0025	0.013 ± 0.0069	0.0079 ± 0.0047
Pb	0.019 ± 0.022	0.045 ± 0.041	0.032 ± 0.032	0.024 ± 0.025	0.031 ± 0.031	0.027 ± 0.028	0.020 ± 0.021	0.024 ± 0.029	0.022 ± 0.025
Sr	0.057 ± 0.041	0.057 ± 0.031	0.057 ± 0.036	0.034 ± 0.015	0.056 ± 0.032	0.045 ± 0.023	0.032 ± 0.0086	0.066 ± 0.031	0.049 ± 0.020
Zn	0.12 ± 0.11	0.071 ± 0.038	0.096 ± 0.075	0.10 ± 0.075	0.10 ± 0.11	0.10 ± 0.093	0.065 ± 0.050	0.056 ± 0.041	0.060 ± 0.045
Ca	7.62 ± 1.90	8.69 ± 2.84	8.16 ± 2.37	6.55 ± 1.99	8.03 ± 2.07	7.29 ± 2.03	7.81 ± 2.43	9.00 ± 3.23	8.41 ± 2.83
Fe	0.44 ± 0.18	0.54 ± 0.18	0.49 ± 0.18	0.36 ± 0.17	0.55 ± 0.25	0.46 ± 0.21	0.41 ± 0.20	0.56 ± 0.27	0.48 ± 0.23
Al	0.38 ± 0.21	2.60 ± 2.02	1.49 ± 1.12	0.49 ± 0.52	2.60 ± 1.95	1.55 ± 1.23	0.91 ± 0.73	3.30 ± 1.96	2.11 ± 1.34

Na	4.79 ± 2.04	5.12 ± 2.03	4.95 ± 2.04	3.91 ± 1.29	5.18 ± 2.17	4.54 ± 1.73	4.32 ± 0.76	5.40 ± 1.98	4.86 ±1.37
Mg	1.82 ± 0.48	2.12 ± 1.00	1.97 ± 0.74	1.56 ± 0.47	2.01 ± 0.84	1.78 ± 0.65	1.89 ± 0.59	2.32 ± 1.04	2.11 ± 0.82
V	0.077 ± 0.0049	0.020 ± 0.037	0.014 ± 0.021	0.016 ± 0.015	0.029 ± 0.037	0.022 ± 0.026	0.0083 ± 0.002	0.012 ± 0.075	0.010 ± 0.0048
S	1.86 ± 0.47	2.14 ± 1.04	2.00 ± 0.76	1.71 ± 0.54	2.20 ± 1.10	1.96 ± 0.82	1.56 ± 0.47	2.30 ± 0.93	1.93 ± 0.70

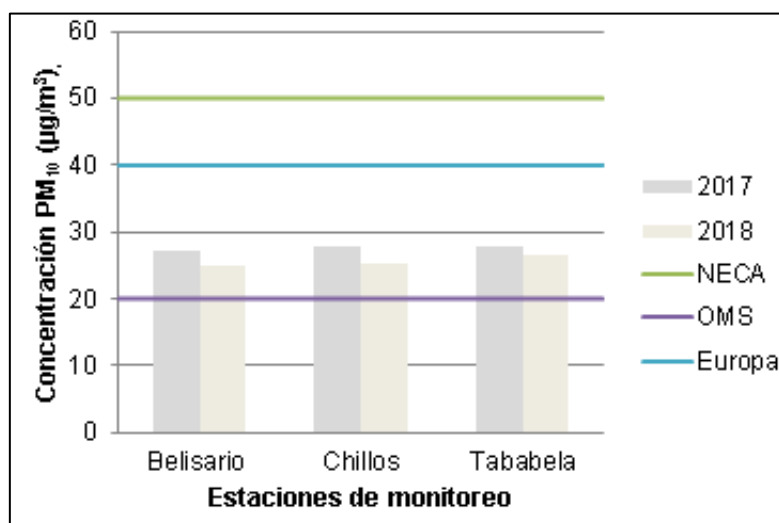


Figura 8. Comparación de las concentraciones promedio anual de PM₁₀ (µg/m³), en los años 2017 y 2018, con la normativa nacional e internacional vigente, para cada estación estudiada

En relación a la concentración de elementos químicos, en general, en el 2018 se alcanzaron valores más elevados de cada elemento químico, en las tres estaciones. Particularmente, en el AI se observa un cambio notable en todas las estaciones.

En el marco de un proyecto internacional realizado en el 2018, en tres ciudades de Sudamérica: São Paulo, Bogotá y Buenos Aires, se obtuvieron las concentraciones de algunos metales (Cd, Mn, Pb y V) en el PM₁₀. Los valores de Cd, Mn, Pb y V resultaron ser 0.0021, 0.052, 0.0616, 0.0089 µg/m³ en São Paulo; 0.0002, 0.023, 0.038, 0.0033 µg/m³ en Bogotá y 0.0003, 0.049, 0.026,

0.007 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en Buenos Aires, respectivamente. En contraste con la información obtenida en el presente trabajo, se identificó que los valores de Mn y Pb de las 3 estaciones fueron más cercanos a los valores obtenidos en la ciudad de Buenos Aires. Por el contrario, en las concentraciones de Cd y V, se evidencia que todas las estaciones exceden por mucho los valores de las otras ciudades, a pesar de que São Paulo se consideraba como la más contaminada (Vasconcellos et al., 2011).

4.1.1. Análisis de Componentes Principales

En las Tablas 8, 9 y 10 se detallan los resultados del Análisis de Componentes Principales de las estaciones Belisario, Los Chillos y Tababela, respectivamente; y en las Figuras 10, 11 y 12 se muestran los gráficos que complementan dichas tablas. Para todas las estaciones, los componentes principales seleccionados fueron cuatro, cuyos *eigenvalues* son mayores a 1 (Braga et al., 2005; Mesías et al., 2018; Ramírez et al., 2019).

En relación a la estación de Belisario (Tabla 8, Figura 10), que es considerada como la zona más urbana, en el PCA se obtuvo que los 4 componentes resultantes del análisis explican el 84.68% de la variabilidad total de los datos de la estación. El primer componente principal (PC1) representa el 51.45% de la variabilidad y agrupó las cargas significativas de los elementos Cu, K, Mn, Sr, Ca, Al, Na, y Mg. En este componente se denota la presencia de elementos naturales asociados con la corteza terrestre (K, Ca, Al, Na y Mg); así como de elementos antrópicos relacionados con la contaminación (Cu, Mn y Sr) (Lazo et al., 2018). El PC2 explica el 15.99% de la variabilidad y los elementos más representativos de este componente son el Cr, Ni, V y S, que pueden ser atribuidos a procesos industriales, y son característicos de la combustión de aceites (Viana et al., 2008). El 10.52% de la variabilidad total se explica con el PC3, que está dominado por Cd, Cu, Pb y Zn, lo cual sugiere la contribución de emisiones relacionadas con el tráfico, provenientes del escape de los vehículos (Viana et al., 2008). Por último, el 6.72% de la variabilidad se encuentra

explicada en el PC4, cuyas cargas más altas son para los metales Zn y K, que son originados en procesos industriales (Marcazzan, Vaccaro, Valli, & Vecchi, 2001; Quijano et al., 2010).

En la Figura 10 se puede observar las correlaciones existentes entre los elementos más significativos del PC1, de manera especial entre el K, Mn y Sr; y del PC2, principalmente entre el S y Ni.

Tabla 8.

Resultado del Análisis de Componentes Principales de la estación Belisario

	PC1	PC2	PC3	PC4
Cd	0.17	-0.074	0.56	-0.33
Cr	0.068	0.25	0.11	-0.32
Cu	0.29	0.084	0.14	-0.035
K	0.32	-0.057	0.086	0.25
Mn	0.34	-0.068	-0.057	-0.076
Ni	0.23	0.44	0.025	-0.016
Pb	0.17	-0.20	0.52	-0.036
Sr	0.34	-0.070	-0.059	-0.030
Zn	0.042	0.083	0.35	0.81
Ca	0.25	-0.29	-0.35	0.051
Fe	0.24	0.058	-0.069	-0.081
Al	0.34	0.032	0.083	-0.12
Na	0.29	-0.25	-0.21	0.14
Mg	0.31	-0.20	-0.20	0.0095
V	0.10	0.54	-0.12	0.038
S	0.21	0.43	-0.15	0.093

Eigenvalue	8.23	2.56	1.68	1.08
Porcentaje de varianza (%)	51.45	15.99	10.52	6.72

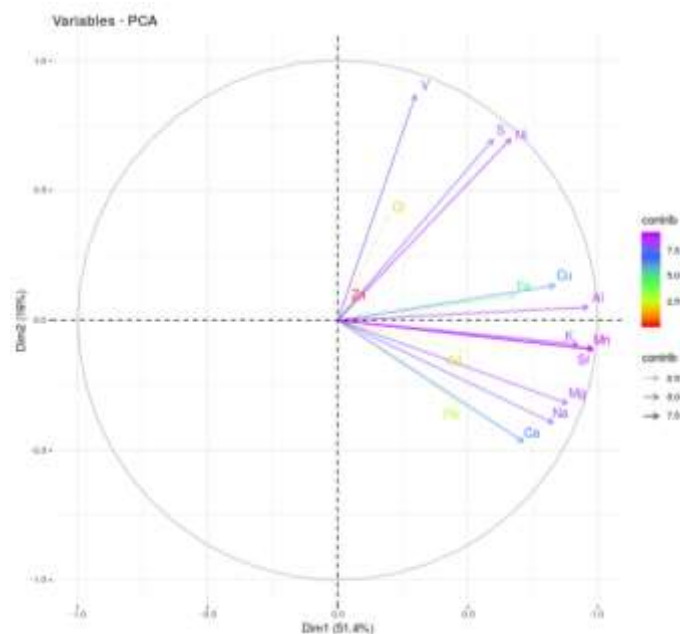


Figura 9. Resultados del Análisis del Componente Principales de la estación Belisario

En el PCA de Los Chillos (Tabla 9, Figura 11), se observa que, los 4 componentes principales explican el 82.31% de la variabilidad total de los datos de la estación. De este porcentaje, el PC1 explica el 53.12%, el PC2 el 13.73%, el PC3 el 8.31% y el PC4 el 7.16%.

El primer componente agrupó las cargas significativas de Cd, K, Mn, Sr, Fe, Al, Na, y Mg, lo que evidencia una mezcla entre elementos originarios del suelo (K, Fe, Al, Na y Mg) (Belis, Karagulian, Larsen, & Hopke, 2013), y elementos que se emiten durante actividades industriales (Cd, Mn y Sr). Respecto al segundo componente, se observa que existe dominancia de elementos naturales como el Ca y Na. El componente 3 tiene cargas significativas de Cd, Cr, Ni y Pb; que son característicos de la industria productora de materiales de construcción,

como el hormigón (Ogunkunle & Fatoba, 2014; Petek, Masanet, Horvath, & Stadel, 2014). Por otro lado, los elementos de este componente (Cd, Cr, Ni y Pb) también son propios del desgaste de frenos y neumáticos ocasionados por el tráfico vehicular (Ramírez et al., 2019). El último componente principal, está representado por Cu, Ni y V, que pueden ser emitidos durante la operación en centrales térmicas de combustión de petróleo (García, Moreno, Hernández, & Polo, 2002; Pacyna & Pacyna, 2001; Pastrana et al., 2017).

Es preciso mencionar que la estación Los Chillos se encuentra a pocos kilómetros de distancia la termoeléctrica Guangopolo y de la planta de la empresa Hormigones del Valle S.A., lo cual corrobora los resultados obtenidos. Muchos metales son omnipresentes en diversas materias primas, como combustibles fósiles y minerales metálicos, así como en productos industriales. Algunos de estos metales se evaporan total o parcialmente de las materias primas durante la producción de bienes industriales a temperaturas elevadas, combustión e incineración de desechos (Pacyna & Pacyna, 2001).

La Figura 11 sustenta los resultados obtenidos en cuanto al análisis de PCA de la estación de Los Chillos. Se puede ver las correlaciones entre los elementos de cada uno de los dos primeros componentes principales (PC1 y PC2). En particular, dentro del componente 1 se observa una fuerte correlación entre el Cd, K, Fe y Al.

Tabla 9.

Resultado del Análisis de Componentes Principales de la estación de Los Chillos

	PC1	PC2	PC3	PC4
Cd	0.31	0.0045	0.23	-0.16
Cr	0.0023	-0.25	0.44	-0.30
Cu	-0.040	0.070	-0.37	0.28

K	0.32	-0.017	-0.21	-0.17
Mn	0.33	0.11	-0.0039	-0.020
Ni	0.22	-0.38	0.27	0.29
Pb	0.12	0.086	0.49	-0.24
Sr	0.32	0.059	-0.036	0.013
Zn	0.14	-0.23	-0.39	-0.61
Ca	0.22	0.38	0.20	0.23
Fe	0.30	-0.0082	-0.24	-0.057
Al	0.33	-0.037	0.034	-0.075
Na	0.28	0.33	-0.041	0.15
Mg	0.32	0.22	-0.013	0.065
V	0.15	-0.51	0.014	0.41
S	0.25	-0.39	-0.15	0.12
Eigenvalue	8.50	2.20	1.33	1.15
Porcentaje de varianza	53.12	13.73	8.31	7.16

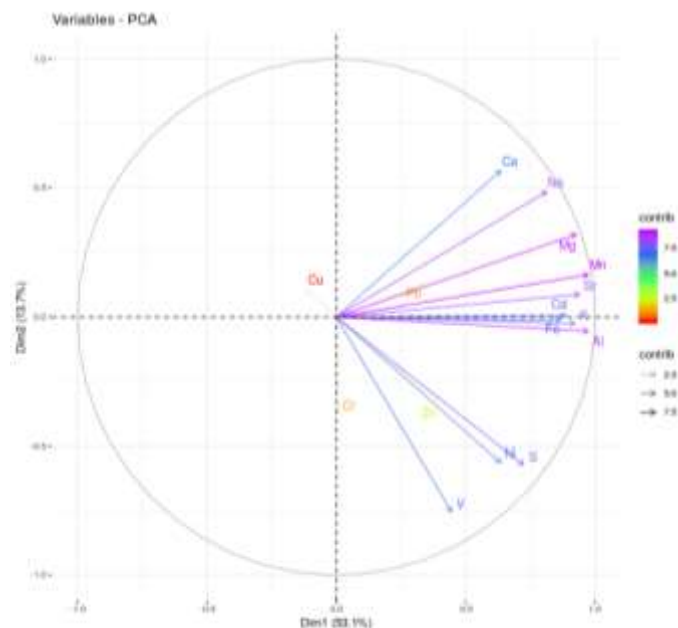


Figura 10. Resultados del Análisis del Componente Principales de la estación de Los Chillos

Respecto al PCA de la estación de Tababela (Tabla 10, Figura 12), se obtuvo que, en total, la suma de la varianza de los 4 componentes principales es de 87.23%. El componente 1 representa el 56.38% de la variabilidad total, agrupando las cargas de los elementos Cd, K, Mn, Ni, Sr, Ca, Fe, Al, Na y Mg. Al igual que en el caso de las dos estaciones revisadas previamente, se evidencia el origen natural y antrópico de este primer grupo. El segundo componente representa el 16.09% de la variabilidad de los resultados, y presenta como las cargas más importantes al Ca y Na. El componente principal 3, que agrupó a los elementos Cr, Pb, Zn y Fe, que comúnmente se encuentran en las emisiones vehiculares, representa el 8.22% de la variabilidad (Belis et al., 2013). Finalmente, el componente 4 representa el 6.54%, del total de la variabilidad, y asoció a los elementos Pb y Zn, cuyo origen es típico de fuentes industriales, especialmente relacionados con los procesos de metalurgia (Zabalza et al., 2006).

Tababela era una parroquia netamente agrícola. Sin embargo, en los últimos años, ha sufrido un importante cambio, a partir de la construcción del Aeropuerto Internacional Mariscal Sucre. Dicha obra ha incentivado, no solamente la inversión pública a través de infraestructura vial de primer orden, sino también la inversión privada relacionada con los servicios de transporte, alimentación y hospedaje, lo cual ha traído como consecuencia el aumento de la circulación vehicular (Capservs Medios, 2015). Sin embargo, en el área, todavía no existen muchas actividades industriales y no se percibe la misma afluencia vehicular como pasa en las dos otras estaciones, por lo que se presume que el suelo se encuentra enriquecido con sedimentos producto del transporte de partículas (Zalakeviciute et al., 2020).

Las correlaciones entre los elementos de los dos primeros componentes principales se muestran en la Figura 12. Especialmente entre el Ca y Na, donde se observa una fuerte correlación.

Tabla 10.

Resultado del Análisis de Componentes Principales de la estación Tababela

	PC1	PC2	PC3	PC4
Cd	0.27	-0.22	-0.11	0.041
Cr	0.020	-0.058	0.43	-0.82
Cu	0.17	-0.018	-0.30	0.092
K	0.32	0.0012	-0.0070	0.034
Mn	0.31	0.18	0.058	0.045
Ni	0.28	-0.29	-0.16	-0.095
Pb	0.087	-0.30	0.60	0.28
Sr	0.32	0.12	-0.0070	-0.0028
Zn	0.018	-0.46	0.28	0.27
Ca	0.28	0.32	0.096	-0.12

Fe	0.28	-0.028	0.29	0.074
Al	0.32	0.031	0.080	0.11
Na	0.27	0.30	0.014	0.14
Mg	0.30	0.24	0.087	-0.057
V	0.23	-0.39	-0.25	-0.090
S	0.20	-0.35	-0.28	-0.30
Eigenvalue	9.02	2.57	2.57	1.05
Porcentaje de varianza	56.38	16.09	8.22	6.54

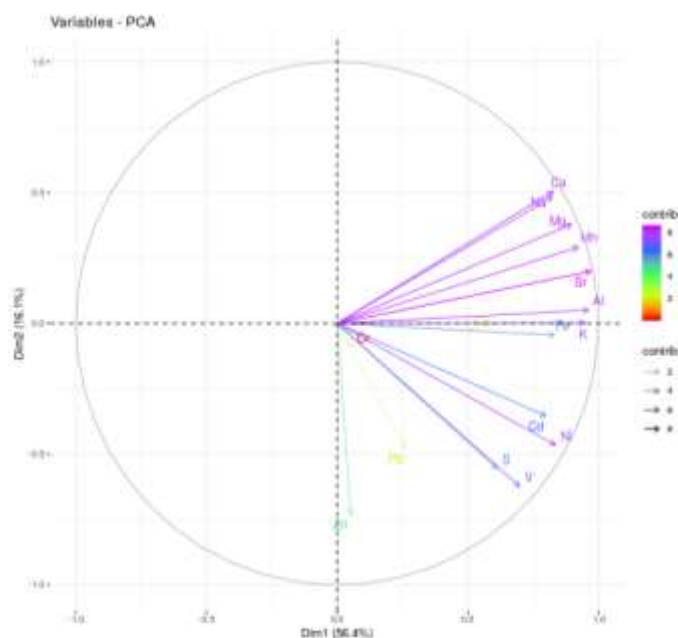


Figura 11. Resultados del Análisis del Componente Principales de la estación Tababela

En las 3 estaciones, los resultados se ven influenciados por el tráfico vehicular, debido a que la combustión de todo tipo de gasolina provoca la emisión metales a la atmósfera. Estos se depositan en la carretera y posteriormente se vuelven a suspender por el tráfico junto con partículas de polvo mineral y material de desgaste de la carretera (Viana et al., 2008). A pesar de que la

gasolina con plomo fue eliminada en Ecuador hace varios años (en 2000), el Pb puede permanecer por varias décadas debido a emisiones vehiculares previas (Ramírez et al., 2019)

4.1.2. Análisis de varianza ANOVA

Para cada elemento químico, se realizaron análisis de varianza con el fin de evaluar si existen diferencias estadísticamente significativas dentro de cada estación para sus dos años de análisis (variación entre los años), y para un mismo año entre las tres estaciones en estudio (variación entre estaciones) (Tabla 11). Si el valor p obtenido es menor que el valor de significancia, entonces se rechaza la hipótesis nula (H_0) y se asume que existe al menos una media diferente.

Como se puede observar en la Tabla 11, los elementos que muestran una diferencia estadísticamente significativa de concentración entre ambos años, en las tres estaciones son el Cd, Mn y Al. Por otro lado, también existen diferencias significativas entre ambos años en las concentraciones de K, Ni, Sr y Na en las estaciones de Los Chillos y de Tababela. Finalmente, la variabilidad anual también produce efectos significativos en las concentraciones de Zn en Belisario; Cu, Ca, Fe, y Mg en Los Chillos; y S en Tababela.

En lo referente a la variación entre estaciones, se observa que, solamente existen diferencias significativas en el 2017 para el Cu, Mn, Sr, y Al; ya que en el 2018 todos los valores de p superan el nivel de significancia. En los 4 metales en los que el ANOVA indicó efectos significativos, se aplicó la prueba de comparaciones múltiples Tukey (Tabla 12), de manera a identificar entre que pares de estaciones se producen los efectos significativos.

Tabla 11.

Resultados del ANOVA para la variación entre años dentro de cada estación, y para la variación entre estaciones para un mismo año

Elemento	Variación entre los años			Variación entre estaciones	
	Belisario	Chillos	Tababela	2017	2018
PM10	0.41	0.42	0.80	0.99	0.89
Cd	0.00061 ***	0.0012 **	0.0056 **	0.26	0.28
Cr	0.11	0.75	0.11	0.16	0.95
Cu	0.98	0.019 *	0.32	0.0038 **	0.17
K	0.86	8.73e-06 ***	2.57e-08 ***	0.050	0.68
Mn	0.0079 **	9.28e-06 ***	2.05e-05 ***	0.037 *	0.65
Ni	0.89	0.017 *	1.95e-06 ***	0.16	0.77
Pb	0.071	0.57	0.65	0.80	0.55
Sr	0.98	0.0072 **	4.15e-05 ***	0.0050 **	0.56
Zn	0.043 *	0.99	0.55	0.10	0.12
Ca	0.16	0.022 *	0.21	0.14	0.51
Fe	0.081	0.0076 **	0.070	0.37	0.98
Al	1.65e-05 ***	4.68e-05 ***	1.50e-05 ***	0.0062 **	0.48
Na	0.59	0.027 *	0.031 *	0.17	0.91
Mg	0.24	0.036 *	0.13	0.098	0.62
V	0.25	0.24	0.067	0.062	0.31
S	0.36	0.15	0.015 *	0.32	0.89

Códigos de significancia:

*** $0 < p < 0.001$

** $0.001 < p < 0.01$

* $0.01 < p < 0.05$

Tabla 12.

Resultados del valor de p de la prueba Tukey entre pares de estaciones en el 2017. Belisario (B), Los Chillos (C) y Tababela (T).

Metal	Comparación entre estaciones		
	B - C	B - T	C - T
Cu	0.052	0.56	0.0033
Mn	0.095	0.047	0.95
Sr	0.017	0.0093	0.97
Al	0.79	0.0068	0.043

Aplicando el mismo criterio del valor de significancia ($p < 0.05$), se compararon los valores de p obtenidos en la prueba Tukey. Respecto al Cu, los resultados muestran que hay diferencias significativas entre las estaciones Los Chillos y Tababela. Para el Mn se identificaron diferencias entre Belisario y Tababela. En el caso del Sr las diferencias son significantes entre Belisario y Chillos, y también entre Chillos y Tababela. Por último, para el Al, se encontraron diferencias entre Belisario y Tababela; y entre Chillos y Tababela.

Como se mencionó anteriormente, Tababela presenta las concentraciones más bajas de los elementos que tienen origen antrópico, debido a que se considera como la estación menos afectada de las tres. Se presume que esta es la razón por la que metales como el Cu, Sr, Mn y Al presenten diferencias significativas cuando se comparan con Belisario y Los Chillos, donde existe mayor influencia del transporte y de las actividades industriales respectivamente.

4.2. Concentración de elementos químicos en hojas de *Araucaria heterophylla*

En las Tablas 13, 14 y 15 se presentan los resultados promedio del análisis de metales, de las muestras de hojas de *Araucaria heterophylla* recolectadas mensualmente en las áreas de estudio.

Se puede observar que, en las tres áreas, las concentraciones de Zn y Al son las más elevadas durante el mes de agosto. Lo mismo ocurre con el Mn para el mes de noviembre. Por otro lado, se identificó un patrón de coincidencia, ya que las concentraciones de Cr y Ca presentan valores más altos en el mes de agosto para la estación Belisario, en septiembre para Los Chillos y en noviembre para Tababela.

En la Tabla 13 se puede observar que, en la estación Belisario, las concentraciones más altas para Ba, Cr, Pb, Zn, Ca, Fe, Al, y Mg se presentan en el mes de agosto; para Co, Cu y K en el mes de septiembre; y para Mn en el mes de noviembre.

Por otro lado, las concentraciones más altas en la estación de Los Chillos (Tabla 14), para el mes de agosto, son de K, Pb, Zn, Fe, Al, y Mg; para el mes de septiembre son de Cr, Cu, y Ca; y para el mes de noviembre son para Ba y Mn.

Finalmente, como se puede observar en la Tabla 15, los análisis arrojaron que, en la estación Tababela, durante el muestreo del mes de agosto, las concentraciones más elevadas fueron de Zn y Al; en el mes de septiembre fueron de K y Mg; y en el mes de noviembre fueron de Ba, Cr, Cu, Mn, Ca y Fe.

Tabla 13.

*Concentración de metales (μg de metal/g de base seca) en las hojas de *Araucaria heterophylla* cerca de la estación de Belisario durante los meses de agosto, septiembre y noviembre*

Belisario				
Elemento	Agosto	Septiembre	Noviembre	Promedio
Ba	113.60	81.61	77.79	91.00
Co	0.21	0.54	0.21	0.32
Cr	4.58	3.74	2.56	3.63
Cu	11.84	15.80	8.80	12.15
K	2260.02	4891.32	2483.95	3211.76
Mn	239.01	284.97	620.65	381.54
Pb	5.38	2.30	1.47	3.05
Zn	65.31	48.61	31.03	48.32
Ca	30203.96	25209.23	27468.49	27627.23
Fe	892.20	815.17	494.59	733.99
Al	1905.57	633.10	449.75	996.14
Mg	4310.66	4151.82	3535.73	3999.40

Tabla 14.

*Concentración de metales (μg de metal/g de base seca) en las hojas de *Araucaria heterophylla* cerca de la estación de Los Chillos durante los meses de agosto, septiembre y noviembre*

Los Chillos				
Elemento	Agosto	Septiembre	Noviembre	Promedio
Ba	43.68	42.16	50.21	45.35
Co	ND	0.21	ND	0.21
Cr	0.40	0.94	0.30	0.55
Cu	2.80	4.86	2.28	3.32
K	3802.50	3775.95	1516.07	3031.51
Mn	131.48	115.50	162.44	136.47
Pb	1.43	1.15	1.14	1.24
Zn	19.30	18.98	14.32	17.53
Ca	18763.82	19739.39	16206.02	18236.41
Fe	356.01	301.64	176.76	278.14
Al	1223.27	393.03	310.59	642.30
Mg	4221.94	3845.58	4210.37	4092.63

Tabla 15.

*Concentración de metales (μg de metal/g de base seca) en las hojas de *Araucaria heterophylla* cerca la estación de Tababela durante los meses de agosto, septiembre y noviembre*

Tababela				
Elemento	Agosto	Septiembre	Noviembre	Promedio
Ba	116.27	107.92	230.80	151.66
Co	ND	0.10	ND	0.10
Cr	0.39	0.46	1.28	0.71
Cu	1.95	3.53	3.66	3.05
K	4484.68	5711.39	3433.29	4543.12
Mn	355.27	212.71	581.13	383.03
Pb	0.86	ND	ND	0.86
Zn	23.71	14.13	17.04	18.29
Ca	16954.29	17493.14	24785.80	19744.41
Fe	230.48	111.01	284.47	208.66
Al	1038.32	174.19	489.91	567.47
Mg	2490.87	2924.64	2360.92	2592.14

Las concentraciones medias de los elementos en las estaciones Belisario y Los Chillos se encuentran en el orden $\text{Ca} > \text{Mg} > \text{K} > \text{Al} > \text{Fe}$ y en Tababela en el orden $\text{Ca} > \text{K} > \text{Mg} > \text{Al} > \text{Mn}$. Los tres elementos con las concentraciones más altas en todas las estaciones (Ca, K y Mg) son macronutrientes considerados esenciales para el metabolismo vegetal y, por lo tanto, forman parte de la composición de los tejidos (Fernández & Carballeira, 2001). Por otra parte, el Fe, Mn y Al son tres componentes principales de la litosfera, los dos primeros están asociados con procesos geoquímicos y el tercero aumenta su movilidad y toxicidad para las plantas en ambientes ácidos (Illi et al., 2017).

4.2.1. Análisis de varianza ANOVA

Al igual que con las muestras de filtros, se realizó un ANOVA para cada metal encontrado en las muestras de las plantas, a fin de determinar si existen diferencias significativas entre los valores de concentración obtenidas en las 3 áreas de estudio. Los resultados de dicho análisis se muestran en la Tabla 16. Se puede observar que las concentraciones de Cr, Cu, Zn, Ca, Fe, y Mg presentan diferencias estadísticamente significativas entre estaciones.

Con el objeto de identificar entre que pares de estaciones se producen los efectos significativos, se realizó la prueba de Tukey (Tabla 17). Se puede observar que existen diferencias estadísticamente significativas en las concentraciones de todos estos metales entre la estación de Belisario y Tababela. Lo mismo ocurre entre la estación Belisario y Los Chillos, excepto para el Mg. Como se puede observar, Belisario presenta la mayor parte de diferencias significativas con respecto a las otras dos estaciones. Dichos resultados son coherentes ya que este es el sitio más urbanizado de todo el estudio, por lo que se obtuvieron las concentraciones más altas. Respecto a la comparación entre la estación de Los Chillos y de Tababela, se identificó que solamente la concentración de Mg presentó diferencias estadísticamente significativas.

Tabla 16.

Resultados del ANOVA para cada metal detectado en las hojas de Araucaria heterophylla entre las estaciones Belisario, Los Chillos y Tababela

Elemento	Variación entre estaciones
Ba	0.053
Co	0.65
Cr	0.0024 **
Cu	0.0039 **

K	0.37
Mn	0.18
Pb	0.33
Zn	0.018 *
Ca	0.020 *
Fe	0.0079 **
Al	0.66
Mg	0.0019 **

Códigos de significancia:

*** $0 < p < 0.001$

** $0.001 < p < 0.01$

* $0.01 < p < 0.05$

Tabla 17

Resultados del valor de p de la prueba Tukey para PM_{10} entre pares de estaciones del 2017. Belisario (B), Los Chillos (C) y Tababela (T).

Metal	Comparación entre estaciones		
	B - C	B - T	C - T
Cr	0.0036	0.0047	0.95
Cu	0.0070	0.0061	0.99
Zn	0.026	0.029	0.99
Ca	0.023	0.047	0.83
Fe	0.018	0.0096	0.83
Mg	0.93	0.0038	0.0028

4.3. Comparación de las concentraciones de los elementos químicos obtenidas en los filtros y en las hojas de *Araucaria heterophylla*

Como ya se mencionó anteriormente en el apartado 3.5.2, la comparación entre las concentraciones de elementos en los filtros y en las hojas de *Araucaria heterophylla* fue realizada usando las unidades en mg de elemento/kg de muestra. La comparación fue hecha para los elementos a los que se verificó el porcentaje de recuperación (Tablas 5 y 6), y que coinciden en ambas matrices (Cr, Cu, K, Mn, Pb, Zn, Ca, Fe, Al y Mg). Debido a que las muestras del material vegetal fueron de los meses de agosto, septiembre y noviembre, se usaron los datos de estos mismos meses del PM₁₀ para realizar la comparación. Adicionalmente, en el Anexo 6, se incluye las comparaciones de los metales que coinciden en el material particulado y vegetal utilizando todos los meses de análisis del PM₁₀.

En las Tablas 18, 19 y 20 se muestran los resultados de ambos materiales (PM₁₀ y vegetal) para los meses de agosto, septiembre y noviembre, en cada una de las estaciones y sus respectivas áreas en estudio. Cabe mencionar que no se cuentan con datos de PM₁₀ para el mes de noviembre de 2017 en ninguna de las tres estaciones. Por otro lado, en el caso de Tababela tampoco fue posible conseguir los dos datos de los meses de agosto y septiembre; ni un dato del mes de noviembre de 2018.

Comparando los resultados obtenidos en las tres tablas, se cumple que, en general, para todos los casos, las concentraciones más altas de Cr, Cu y Pb se presentan en el PM₁₀, mientras que de K, Mn, Ca, y Mg se presentan en las hojas de *Araucaria heterophylla*.

Para los elementos que no presentaron un comportamiento regular en todas las estaciones, como es el caso de Al, Fe y Zn, se realizó una revisión individual dentro de cada estación para identificar su comportamiento en cada mes de análisis.

Respecto al metal Al, se observa que, en general, la concentración es mayor en el material vegetal durante los tres meses y en las tres estaciones, con

excepción del mes de septiembre en Tababela, donde la concentración fue mayor en el PM₁₀ que en las hojas.

En relación al Fe, se puede observar que, en el caso de Belisario y de Los Chillos, en los 3 meses, se presenta concentraciones más altas en las plantas. En cambio, en Tababela, se puede observar que, durante los meses de agosto y septiembre, el Fe se encontró en mayor concentración en el material particulado y, por el contrario, en el mes de noviembre se identificó que su concentración fue superior en las hojas de *Araucaria heterophylla*.

Finalmente, en el caso del Zn, en la estación Belisario, tanto en agosto como en septiembre, se observó mayor concentración en el material vegetal. Sin embargo, la tendencia cambió para el mes de noviembre donde, a pesar de presentar valores similares en ambos materiales, fue superior en el PM₁₀. En tanto, que en las otras dos estaciones, la concentración de Zn, fue más elevada en el material particulado que en las hojas para los tres meses.

Tabla 18.

Concentración de metales (mg/kg) en el material particulado PM₁₀ y en las hojas de Araucaria heterophylla en la estación de monitoreo Belisario durante los meses de agosto, septiembre y noviembre.

Elemento	Belisario					
	Agosto		Septiembre		Noviembre	
	PM ₁₀	<i>Araucaria heterophylla</i>	PM ₁₀	<i>Araucaria heterophylla</i>	PM ₁₀	<i>Araucaria heterophylla</i>
Cr	1.81	2.13	2.26	1.59	3.40	1.20
Cu	9.64	5.51	12.47	6.73	14.33	4.14
K	118.18	1051.32	125.95	2082.35	167.48	1169.29

Mn	11.89	111.18	11.75	121.32	15.58	292.16
Pb	3.12	2.50	3.56	0.98	7.81	0.69
Zn	7.98	30.38	12.30	20.70	15.13	14.61
Ca	2117.80	14050.33	2222.13	10732.14	2600.04	12930.48
Fe	104.10	415.04	137.46	347.04	97.75	232.82
Al	110.22	886.44	135.63	269.52	72.04	211.72
Mg	504.84	2005.24	445.57	1767.52	495.92	1664.41

Tabla 19.

Concentración de metales (mg/kg) en el material particulado PM_{10} y en las hojas de *Araucaria heterophylla* en la estación de monitoreo Los Chillos durante los meses de agosto, septiembre y noviembre.

Elemento	Los Chillos					
	Agosto		Septiembre		Noviembre	
	PM_{10}	<i>Araucaria heterophylla</i>	PM_{10}	<i>Araucaria heterophylla</i>	PM_{10}	<i>Araucaria heterophylla</i>
Cr	1.34	0.19	2.27	0.45	2.23	0.15
Cu	66.23	1.32	13.37	2.30	22.97	1.12
K	115.66	1791.75	142.53	1788.43	169.22	746.27
Mn	11.10	61.96	10.92	54.70	14.80	79.96
Pb	3.32	0.67	5.00	0.54	1.20	0.56
Zn	9.32	9.09	15.01	8.99	16.47	8.17
Ca	1917.37	8841.59	1869.55	9349.30	2332.16	7977.23
Fe	117.28	167.75	141.95	142.87	52.34	87.01
Al	113.86	576.41	146.28	186.16	56.25	152.88

Mg	398.60	1989.39	395.11	1821.41	455.67	2072.50
----	--------	----------------	--------	----------------	--------	----------------

Tabla 20.

Concentración de metales (mg/kg) en el material particulado PM_{10} y en las hojas de *Araucaria heterophylla* en la estación de monitoreo Tababela durante los meses de agosto, septiembre y noviembre.

Elemento	Tababela					
	Agosto		Septiembre		Noviembre	
	PM_{10}	<i>Araucaria heterophylla</i>	PM_{10}	<i>Araucaria heterophylla</i>	PM_{10}	<i>Araucaria heterophylla</i>
Cr	1.01	0.18	1.12	0.22	0.98	0.51
Cu	10.41	0.92	11.63	1.72	13.96	1.92
K	104.41	2126.12	134.90	2785.86	218.52	1802.25
Mn	9.58	168.43	10.69	103.75	24.74	305.06
Pb	6.20	0.41	3.40	ND	4.65	ND
Zn	12.91	11.24	10.77	6.89	21.31	8.94
Ca	1943.64	8037.76	2266.16	8532.66	3676.38	13010.94
Fe	126.88	109.27	177.43	54.15	82.56	149.33
Al	142.99	492.25	195.82	84.97	102.65	257.17
Mg	532.36	1180.88	514.26	1426.56	719.01	1239.33

Esta explicación, de lo que se observa en las Tablas 18, 19 y 20, se encuentra resumida en la Tabla 21, donde se puede observar cual es el material (PM_{10} o hojas de *Araucaria heterophylla*) que contiene las concentraciones más altas de cada metal en cada mes, según la estación.

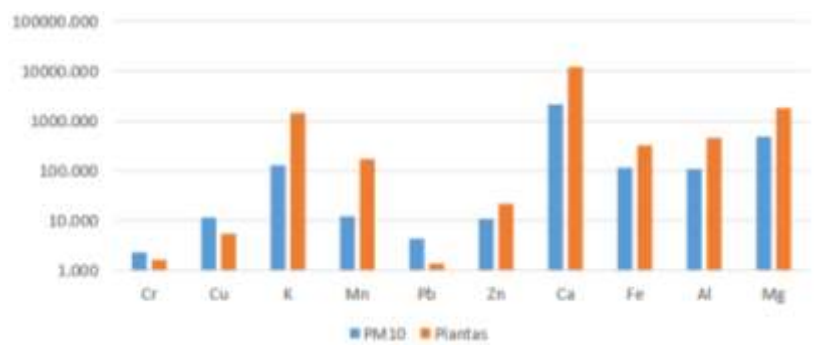
Tabla 21.

Identificación de las concentraciones más elevadas de los metales en el material particulado (PM) y material vegetal (MV) en las tres estaciones de monitoreo durante los meses de agosto, septiembre y noviembre.

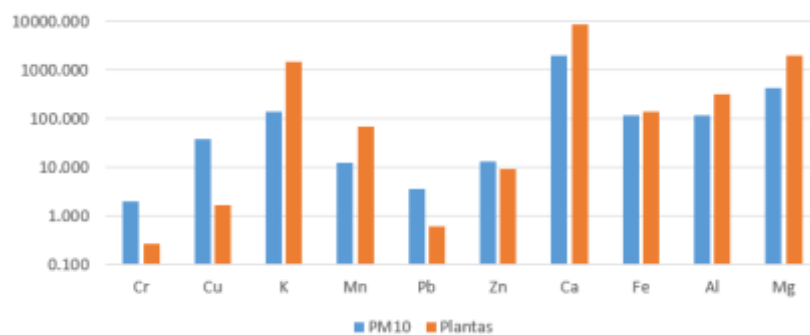
Elemento	Estaciones de monitoreo								
	Belisario			Los Chillos			Tababela		
	Ago.	Sept.	Nov.	Ago.	Sept.	Nov.	Ago.	Sept.	Nov.
Cr	PM	PM	PM	PM	PM	PM	PM	PM	PM
Cu	PM	PM	PM	PM	PM	PM	PM	PM	PM
K	MV	MV	MV	MV	MV	MV	MV	MV	MV
Mn	MV	MV	MV	MV	MV	MV	MV	MV	MV
Pb	PM	PM	PM	PM	PM	PM	PM	PM	PM
Zn	MV	MV	PM	PM	PM	PM	PM	PM	PM
Ca	MV	MV	MV	MV	MV	MV	MV	MV	MV
Fe	MV	MV	MV	MV	PM	MV	PM	PM	MV
Al	MV	MV	MV	MV	MV	MV	MV	PM	MV
Mg	MV	MV	MV	MV	MV	MV	MV	MV	MV

Para una mejor interpretación de los resultados, en la Figura 13 se presenta una comparación entre los promedios de los meses de agosto, septiembre y noviembre de los filtros de PM₁₀ con los de las hojas de Araucaria heterophylla, de las estaciones: Belisario, Chillos y Tababela.

a)



b)



c)

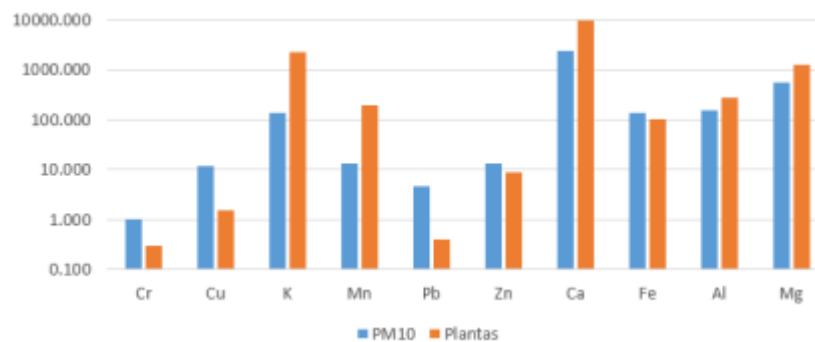


Figura 12. Comparación de las concentraciones promedio de los filtros de PM_{10} y hojas de *Araucaria heterophylla* de las estaciones en estudio durante los meses de agosto, septiembre y noviembre

a) Estación Belisario

b) Estación Los Chillos

c) Estación Tababela

Un estudio similar conducido entre 2012 y 2014 en Brasil (Henrique et al., 2015), comparó los resultados de la caracterización elemental del $PM_{2.5}$ y de la especie vegetal *Struthanthus flexicaulis*. Los metales analizados en este estudio, coinciden con los utilizados dentro de este apartado (Cr, Cu, K, Mn, Pb, Zn, Ca, Fe, Mg) a excepción del Al. En definitiva, se obtuvo que solamente el Zn presentó valores más elevados en los filtros del aire, mientras que las concentraciones de resto de elementos fueron superiores en las hojas de las plantas. Estos resultados difieren con los obtenidos en el presente análisis ya que, para todas las estaciones, no solamente el Zn, sino también el Cr, Cu, y Pb mostraron valores más altos en el PM_{10} , mientras que en el resto de elementos, si se presentaron valores superiores en la *Araucaria heterophylla* en algunos meses.

4.3.1. Análisis de varianza ANOVA

En la Tabla 22 se muestran los resultados del análisis de ANOVA, realizado a los metales de cada matriz (PM_{10} y plantas) analizados en los meses de agosto, septiembre y noviembre. En el Anexo 6, se incluye el análisis de varianza de las concentraciones de material particulado y vegetal en las tres estaciones, utilizando todos los meses de análisis del PM_{10} .

Como se puede observar en la Tabla 22, en las tres áreas de estudio, existen diferencias estadísticamente significativas entre las concentraciones de K, Mn, Ca y Mg de ambas matrices. A su vez, se encontró que, para el Cu existen diferencias significativas en Tababela y Los Chillos. Por otro lado, en la estación Belisario, se presentaron diferencias en las concentraciones de los elementos Zn y Fe, mientras que en Tababela para Cr.

Tabla 22.

Resultados del ANOVA para cada metal detectado en los filtros del aire y en las hojas de Araucaria heterophylla, para las estaciones Belisario, Chillos y Tababela para los meses de agosto, septiembre y noviembre

Elemento	Variación entre matrices		
	Belisario	Chillos	Tababela
Cr	0.34	0.066	0.00018 ***
Cu	0.0041 **	0.41	0.024 *
K	5.27e-06 ***	9.70e-06 ***	6.36e-05 ***
Mn	0.00014 ***	3.24e-08 ***	0.0062 **
Pb	0.29	0.063	0.12
Zn	0.011 *	0.16	0.17
Ca	7.05e-10 ***	1.78e-10 ***	0.0010 **
Fe	5.48e-05 ***	0.49	0.41
Al	0.0087 **	0.023 *	0.24
Mg	8.19e-09 ***	1.42e-10 ***	0.00022 ***

Códigos de significancia:

*** $0 < p < 0.001$

** $0.001 < p < 0.01$

* $0.01 < p < 0.05$

5. Conclusiones y Recomendaciones

5.1. Conclusiones

Se cuantificaron los elementos químicos presentes en los filtros de las estaciones de monitoreo de la REMMAQ: Belisario, Chillos y Tababela. Las concentraciones promedio de PM₁₀ en los tres lugares estuvieron en un rango de 25.10 a 27.86 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. A pesar de que, en la composición del material particulado PM₁₀ de las muestras de filtros del aire se encontraron varios metales, la concentración promedio de este contaminante no supero la media anual establecida en la NECA como límite máximo permisible (50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Los elementos que presentaron valores más altos de concentración, en todos los casos, fueron el Al, Ca, Fe, K, Mg, Na, y S, que son propios de fuentes naturales. La estación Belisario difiere de las otras por presentar concentraciones más altas de Cd, Cr, Mn, Ni, Pb, y Sr, que están asociadas con actividades humanas, particularmente con el tráfico vehicular. La estación Los Chillos, comparada con los otros dos sitios de muestreo, obtuvo concentraciones más elevadas de Cu, Zn, y V, que están relacionados con actividades industriales. Finalmente, se encontró que la estación Tababela presentó concentraciones más altas de elementos naturales como el Ca, Al y Mg.

Los resultados de concentración de metales en las hojas de *Araucaria heterophylla*, recogidas en las áreas de estudio, revelaron los mayores valores de Al, Ca, Mg, Fe y K en las tres estaciones, comparado con el resto de metales analizados. Todos estos elementos provienen de fuentes naturales como el suelo, el polvo y la resuspensión. De manera especial el Ca, K y Mg son macronutrientes considerados esenciales para el metabolismo vegetal y, por lo tanto, forman parte de la composición de los tejidos.

El material particulado y el material vegetal son considerados matrices adecuadas que permiten caracterizar la contaminación del aire y las fuentes de emisión de un lugar, en base a su composición multielemental. La comparación de los resultados obtenidos en ambas matrices, permitió encontrar que, en

todas las estaciones, se cumple que las concentraciones más altas de Cr, Cu y Pb se presentan en el PM₁₀, mientras que de K, Mn, Ca, y Mg se identificaron en las hojas de *Araucaria heterophylla*. La diferencia más alta entre las concentraciones de los metales provenientes de fuentes antrópicas (Cr, Cu, Pb y Zn), obtenidas en las plantas y en el PM₁₀, se presenta en la estación Tababela, que es la zona periurbana considerada como la menos afectada por actividades humanas de los tres lugares, ya que los niveles de contaminación aumentaron significativamente a partir de la construcción y operación del Aeropuerto internacional Mariscal Sucre en el 2013.

5.2. Recomendaciones

Por lo descrito anteriormente, el incremento en la concentración individual de la mayoría de metales en el 2018 constituye un importante referente para seguir monitoreando sus futuras tendencias a fin de mantener un ambiente más limpio. Por otro lado, esta investigación se realizó solamente para tres estaciones de monitoreo con sus respectivas áreas de estudio, sin embargo existen muchos lugares dentro del Distrito Metropolitano de Quito donde se puede aplicar la misma metodología para identificar cuáles son los niveles de contaminación a los que están expuestas las personas en cada zona.

Las autoridades deberían enfocarse en buscar alternativas viables para disminuir la contaminación, principalmente en temas relacionados con el transporte ya sea público o privado, debido a que constituye una de las principales actividades que aportan a la contaminación dentro de la ciudad. Así como también, deberían aplicar medidas de control más estrictas para asegurarse de que los responsables de la contaminación del aire puedan ser sancionados. En la ciudad de Quito, este problema constituye un reto en términos de salud pública debido a la constante exposición de la ciudadanía a elementos peligrosos que provocan efectos más graves sobre los grupos vulnerables, como niños, ancianos y personas con problemas de salud.

REFERENCIAS

- Abdulaziz, K., Al-Nadji, K., Kadri, A., & Kakosimos, K. (2017). Airborne particulate matter passive samplers for indoor and outdoor exposure monitoring: Development and Evaluation. *XIII International Conference on Air Pollution and Control*. Recuperado el 15 de diciembre de 2019 de https://www.researchgate.net/profile/Konstantinos_Kakosimos/publication/320015014_Airborne_Part particulate_Matter_Passive_Samplers_for_Indoor_and_Outdoor_Exposure_Monitoring_Development_and_Evaluation/links/59c899bfa6fdccc719240396/Airborne-Particulate-Matter
- Abril, G., Wannaz, E., Mateos, A., Invernizzi, Plá, R., & Pignata, M. (2014). Characterization of atmospheric emission sources of heavy metals and trace elements through a local-scale monitoring network using T. capillaris. *Ecological Indicators*, 40 (2014), 153–161. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.01.008>
- Agencia Europea de Medio Ambiente. (2013). *La calidad del aire en Europa - Informe 2012*. Recuperado el 05 de octubre de 2019 de https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/publicaciones/Calidad_Aire_en_Europa_tcm30-185090.pdf
- Alatou, H., & Sahli, L. (2019). Using tree leaves and barks collected from contaminated and uncontaminated areas as indicators of air metallic pollution. *International Journal of Phytoremediation*, 21(10), 985–997. <https://doi.org/10.1080/15226514.2019.1583723>
- Amaya, M., Martínez, A., & Rizzo, A. (2008). *Protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire*. Recuperado el 10 de septiembre de 2019 de <http://www.ideam.gov.co/documents/51310/527391/Protocolo+para+el+Monitoreo+y+seguimiento+de+la+calidad+del+aire.pdf/6b2f53c8-6a8d-4f3d-b210-011a45f3ee88>
- Arcínegas, C. (2012). Diagnóstico y Control de Material Particulado: Partículas

Suspendidas Totales Y Fracción Respirable Pm10. *Luna Azul*, 34, 195–213. <https://doi.org/10.17151/luaz.2012.34.12>

Astudillo, A., Ramírez, M., García, N., González, G., Gutiérrez, I., & Bailón, N. (2015). Caracterización química del material particulado PM10 de la zona urbana de Cuenca - Ecuador e investigación de su genotoxicidad e inducción de estrés oxidativo en células epiteliales alveolares A549. *Revista Toxicol*, 32, 121–126. Recuperado el 04 de agosto de 2019 de http://rev.aetox.es/wp/wp-content/uploads/hemeroteca/vol32-2/vol_32-2-121-126.pdf

Baldantoni, D., De Nicola, F., & Alfani, A. (2014). Air biomonitoring of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons near a cement plant. *Atmospheric Pollution Research*, 5(2), 262–269. <https://doi.org/10.5094/APR.2014.032>

Belis, C., Karagulian, F., Larsen, B., & Hopke, P. (2013). Critical review and meta-analysis of ambient particulate matter source apportionment using receptor models in Europe. *Atmospheric Environment*, 69, 94–108. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.11.009>

Braga, C., Teixeira, E., Meira, L., Wiegand, F., Yoneama, M., & Dias, J. (2005). Elemental composition of PM10 and PM2.5 in urban environment in South Brazil. *Atmospheric Environment*, 39(10), 1801–1815. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.12.004>

Brown, G., Luu, I., & O'Sullivan, G. (2017). Trace Metal Concentrations in Pine Needles at Varying Elevation in Proximity to Roadways in an Urban Environment. *Journal of Environmental Protection*, 8, 733–743. <https://doi.org/10.4236/jep.2017.86047>

Bu-Olay, A., & Thomas, B. (2009). Translocation and bioaccumulation of trace metals in dessert plants of Kuwait governorates. *Research Journal of environmental science*, 6, 271–275. <https://doi.org/10.1111/ijfs.12122>

- Campos, A., Acosta, H., Gómez, R., Carrillo, J., & Ramírez, E. (2015). Evaluación del desempeño del método de alto volumen para la medición de partículas menores a 10 micras. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 31(1), 79–88. Recuperado el 12 de septiembre de 2019 de https://www.researchgate.net/publication/273141145_Evaluacion_del_desempeno_del_metodo_de_alto_volumen_para_la_medicion_de_particulas_menores_a_10_micras
- Canales, M., Quintero, M., Castro, T., & García, R. (2014). Las partículas respirables PM10 y su composición química en la zona Urbana y rural de Mexicali, Baja California en México. *Informacion Tecnológica*, 25(6), 13–22. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642014000600003>
- Cano, V., & Delgado, J. (s/f). *Medida de contaminantes atmosféricos: Métodos pasivos frente a métodos automáticos*. Recuperado el 19 de octubre de 2019 de <http://www.upv.es/upl/U0455035.pdf>
- Capservs Medios. (2015). *Plan de Ordenamiento Territorial de la Parroquia Tababela*. Recuperado el 16 de octubre de 2019 de http://app.sni.gob.ec/sni-link/sni/PORTAL_SNI/data_sigad_plus/sigadplusdiagnostico/1768078140001_1768078140001_24-06-2015_16-57-21.pdf
- Čeburnis, D., & Steinnes, E. (2000). Conifer needles as biomonitors of atmospheric heavy metal deposition: Comparison with mosses and precipitation, role of the canopy. *Atmospheric Environment*, 34(25), 4265–4271. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(00\)00213-2](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(00)00213-2)
- Cevallos, V., Díaz, V., & Sirois, C. (2017). Particulate matter air pollution from the city of Quito, Ecuador, activates inflammatory signaling pathways in vitro. *Innate Immunity*, 23(4), 392–400. <https://doi.org/10.1177/1753425917699864>
- Chuquer, D., Ampudia, S., De la Cruz, C., Bustamante, L., Reina, C., &

- Ramírez, F. (2018). Contaminación del aire a filo de calle en Quito, caso estudio Guayaquil y Espejo. *Perfiles Revista Científica*, 2, 90–99. Recuperado el 13 de diciembre de 2019 de <https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/1753425917699864>
- Contreras, A., García, G., & Icaza, B. (2013). *Calidad del aire: una práctica de vida*. Recuperado el 15 de agosto de 2019 de <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2013/C0001593.pdf>
- Covarrubias, S., & Peña, J. (2017). Contaminación ambiental por metales pesados en México: Problemática y estrategias de fitorremediación. *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, 33, 7–21. <https://doi.org/10.20937/RICA.2017.33.esp01.01>
- Darge, W. (2017). First report of *Lasiodiplodia theobromae* causing needle blight and stem canker diseases on *Araucaria heterophylla* in Ethiopia. *Journal of Horticultural Research*, 25(2), 15–18. <https://doi.org/10.1515/johr-2017-0014>
- Darley, E. (2012). Use of plants for air pollution monitoring. *Journal of the Air Pollution Control Association*, 10(3), 198–199. <https://doi.org/10.1080/00022470.1960.10467919>
- De Temmerman, L., Bell, J., Garrec, J. P., Klumpp, A., Krause, G., & Tonneijck, A. (2004). Biomonitoring of air pollutants with plants - considerations for the future. *Urban Air Pollution, Bioindication and Environmental Awareness*, 337–373. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Díaz, V., López, D., Pallango, E., Chávez, M., & Guerrón, K. (2011). *Informe anual 2011 Calidad del aire*. Recuperado el 15 de agosto de 2019 de http://www.quitoambiente.gob.ec/ambiente/images/Secretaria_Ambiente/red_monitoreo/informacion/iqca_2011.pdf
- Dirección General de Salud Ambiental. (2005). *Protocolo de calidad de aire y*

gestión de datos. Recuperado el 13 de diciembre de 2019 de http://181.177.251.43/norma_consulta/Protocolo-de-Calidad-del-Aire.pdf

Dos Santos, M., Gómez, D., Dawidowski, L., Gautier, E., & Smichowski, P. (2009). Determination of water-soluble and insoluble compounds in size classified airborne particulate matter. *Microchemical Journal*, 91(1), 133–139. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2008.09.001>

Dowling, T. E., & Showman, A. P. (2007). Earth as a Planet: Atmosphere and Oceans. En Academic Press (Ed.), *Encyclopedia of the Solar System* (pp. 169–188). <https://doi.org/10.1016/B978-012088589-3/50013-X>

Egas, C., Naulin, P., & Préndez, M. (2018). Contaminación Urbana por Material Particulado y su Efecto sobre las Características Morfo-Anatómicas de Cuatro Especies Arbóreas de Santiago de Chile. *Informacion Tecnologica*, 29, 111–119. <https://doi.org/10.4067/s0718-07642018000400111>

Einstein, S., Yu, C. H., Mainelis, G., Chen, L. C., Weisel, C., & Liroy, P. (2012). Design and validation of a passive deposition sampler. *Journal of Environmental Monitoring*, 14(9), 2411–2420. <https://doi.org/10.1039/c2em30174a>

Escribano, R., & Tanarro, I. (2006). *Spectroscopy of the atmospheres*. Recuperado el 10 de septiembre de 2019 de <https://ebookcentral.proquest.com/lib/udlasp/detail.action?docID=3192717&query=spectroscopy+of+the+atmosphere#>

Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales, Ministerio del Ambiente, & Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. (2008). *Geo Ecuador, Informe sobre el estado del Medio Ambiente*. Recuperado el 04 de julio de 2019 de <https://biblio.flacsoandes.edu.ec/libros/digital/41444.pdf>

Farjon, A., & Filer, D. (2012). *An atlas of the world's conifers: An analysis of*

their distribution, biogeography, diversity and conservation status. Recuperado el 15 de agosto de 2019 de <https://ebookcentral.proquest.com/lib/udlap/detail.action?docID=1579991&query=an+atlas+of+the+world+conifers>

Fasani, D., Fermo, P., Barroso, P., Martín, J., Santos, J., Aparicio, I., & Alonso, E. (2016). Analytical method for Biomonitoring of PAH using leaves of Bitter Orange Trees (*Citrus aurantium*): a case study in south Spain. *Water, Air, and Soil Pollution*, 227(10), 3–11. <https://doi.org/10.1007/s11270-016-3056-z>

Fernández, J., & Carballeira, A. (2001). Evaluation of contamination, by different elements, in terrestrial mosses. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 40(4), 461–468. <https://doi.org/10.1007/s002440010198>

Francis, J. K. (s/f). *Araucaria heterophylla* (Salisb.) Franco. *Araucaria, Norfolk Island-pine*. Recuperado el 15 de agosto de 2019 de <https://rngr.net/publications/arboles-de-puerto-rico/araucaria-heterophylla/>

Franco, E. (2015). *Identificación del efecto fin de semana en la calidad de aire de Quito Ecuador*. Recuperado el 06 de septiembre de 2019 de <http://repositorio.usfq.edu.ec/bitstream/23000/4183/1/113806.pdf>

Galán, D. (2013). Química medioambiental. Metodología pasiva empleada para la toma de muestra de contaminantes atmosféricos. *Avances en Química*, 8(2), 111–119. Recuperado el 28 de junio de 2019 de <https://www.redalyc.org/pdf/933/93328462008.pdf>

Gallego, A., González, I., Sánchez, B., Fernandez, P., Garcinuño, R., Bravo, J., ... Durand, J. (2012). *Contaminación atmosférica*. Recuperado el 16 de octubre de 2019 de <https://books.google.com.ec/books?id=7xYvtMyRP7EC&pg=PT74&dq=materias+particulado+clasificacion&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwj7x7Lyt8rn>

AhWCmeAKHc0LCyEQ6AEINzAC#v=onepage&q=material particulado clasificacion&f=false

- Galvão, E., Santos, J., Lima, A., Reis, N., DAzeredo, M., & Stuetz, R. (2018). Trends in analytical techniques applied to particulate matter characterization: A critical review of fundamentals and applications. *Chemosphere*, 199, 546–568. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.02.034>
- García, C., Moreno, J., Hernández, M., & Polo, A. (2002). Metales pesados y sus implicaciones en la calidad del suelo. *Ciencia y Medio Ambiente*, 125–138. Recuperado el 05 de mayo de 2019 de <http://digital.csic.es/handle/10261/111812>
- Gernandt, D., & Pérez, J. (2014). Biodiversidad de Pinophyta (coníferas) en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 85, 126–133. <https://doi.org/10.7550/rmb.32195>
- Giacobone, G., & Cabrera, S. (2009). *Líquenes como bioindicadores de calidad de aire*. Recuperado el 21 de abril de 2019 de https://books.google.com.ec/books?id=fsL2CIALuilC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
- Gilman, E., Watson, D., Klein, R., Koeser, A., Hilbert, D., & Mclean, D. (2018). *Araucaria heterophylla: Norfolk Island-Pine*. Recuperado el 15 de septiembre de 2019 de <https://edis.ifas.ufl.edu/pdf/files/ST/ST08300.pdf>
- Grote, R., Samson, R., Alonso, R., Amorim, J. H., Cariñanos, P., Churkina, G., ... Calfapietra, C. (2016). Functional traits of urban trees: air pollution mitigation potential. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 14(10), 543–550. <https://doi.org/10.1002/fee.1426>
- Guillot, D. (2012). Flora ornamental española: aspectos históricos y principales especies. *Bouteloua*, 8, 47–48. Recuperado el 06 de agosto de 2019 de <https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=R5NNGAnk2wIC&oi=f>

nd&pg=PA5&dq=Flora+ornamental+española:+aspectos+históricos+y+pr
incipales+especies&ots=NpocJVe7oB&sig=5QFdZOpsYimpwO2eMv1k
GLcNg4&redir_esc=y#v=onepage&q=araucaria&f=false

- Gul, H., Khattak, A., & Amin, N. (2006). Accelerating the growth of Araucaria Heterophylla seedlings through different gibberellic acid concentrations and nitrogen levels. *Journal of Agricultural and Biological Science*, 1(2), 25–29. Recuperado el 16 de octubre de 2019 de https://www.researchgate.net/profile/Mateen_Khattak/publication/237344983_ACCELERATING_THE_GROWTH_OF_ARAUCARIA_HETEROPHYLLA_SEEDLINGS_THROUGH_DIFFERENT_GIBBERELIC_ACID_CONCENTRATIONS_AND_NITROGEN_LEVELS/links/00463531955b600ce9000000.pdf
- Henrique, P., Mateus, V., Araripe, D., Duyck, C., Saint’Pierre, T., & Gioda, A. (2015). Biomonitoring of metals for air pollution assessment using a hemiepiphyte herb (*Struthanthus flexicaulis*). *Chemosphere*, 138, 429–437. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.06.060>
- Illi, J., Vancetta, T., Alves, D., Migliavacca, D., Bianchin, L., Müller, D., & Juchem, F. (2017). Integrated assessment of air pollution by metals and source apportionment using ryegrass (*Lolium multiflorum* Lam.) in southern Brazil. *Environmental Science and Pollution Research*, 24, 2790–2803. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-8041-y>
- Inche, J. (2004). *Gestión de la calidad del aire: efectos y soluciones*. Recuperado el 05 de mayo de 2019 de http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/libros/geologia/gestion_calidad/Cap09.pdf
- Instituto Nacional de Ecología. (s/f). Principios de medición de la calidad del aire. En *Manuales de buenas prácticas en monitoreo de la calidad del aire* (pp. 3–39). Recuperado el 05 de mayo de 2019 de [https://sinaica.inecc.gob.mx/archivo/guias/1- Principios de Medición de la](https://sinaica.inecc.gob.mx/archivo/guias/1-Principios%20de%20Medici3n%20de%20la)

Calidad del Aire.pdf

- Jiménez, E. (2007). *Estudio, diseño y gestión de sistemas de medición de la contaminación atmosférica en Tarragona*. Recuperado el 19 de octubre de 2019 de <http://deeea.urv.cat/public/PROPOSTES/pub/pdf/1130pub.pdf>
- Koren, H. (1995). Associations between criteria air pollutants and asthma. *Environmental Health Perspectives*, 103, 235–242. <https://doi.org/10.2307/3432379>
- Kroukamp, E., Wondimu, T., & Forbes, P. (2016). Metal and metalloid speciation in plants: Overview, instrumentation, approaches and commonly assessed elements. *Trends in Analytical Chemistry*, 77, 87–99. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2015.10.007>
- Lazo, P., Steinnes, E., Qarri, F., Allajbeu, S., Kane, S., Stafilov, T., ... Harmens, H. (2018). Origin and spatial distribution of metals in moss samples in Albania: A hotspot of heavy metal contamination in Europe. *Chemosphere*, 190, 337–349. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.09.132>
- Ledesma, C. (2014). *Efecto de la contaminación atmosférica por metales pesados en las hojas de los árboles de la zona metropolitana del Valle de Toluca* (Universidad Autónoma del Estado de México). Recuperado el 13 de diciembre de 2019 de https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/46/130/46130341.pdf
- López, G. (2004). *Guía de los árboles y arbustos de la Península Ibérica y Baleares: (especies silvestres y las cultivadas más comunes)*. Recuperado el 10 de septiembre de 2019 de <https://books.google.com.ec/books?id=GWc0z9asxNsC&pg=PA226&dq=araucaria+heterophylla+o+excelsa+o+pino+de+la+isla+de+norfolk&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwjv7OrVuNbkAhUNy1kKHSFDDpkQ6AEILjAB#v=o>

nepage&q&f=false

- López, M., Ceppi, S., Palancar, G., Olcese, L., Tirao, G., & Toselli, B. (2011). Elemental concentration and source identification of PM10 and PM2.5 by SR-XRF in Córdoba City, Argentina. *Atmospheric Environment*, 45(31), 5450–5457. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.07.003>
- López, Sarmiento, A., Fajardo, J., Valarezo, L., & Zuluaga, R. (2013). Determinación del porcentaje de humedad, solubles e insolubles en agua de la fibra de Carludovica Palmata (paja toquilla). *Ingenius*. <https://doi.org/10.17163/ings.n9.2013.03>
- Manosalvas, J. (2017). *Análisis temporal multivariante de la Contaminación Atmosférica dentro del Distrito Metropolitano de Quito* (Universidad Politécnica de Madrid). Recuperado el 04 de enero de 2020 de http://oa.upm.es/47313/1/TFM_Juan_Luis_Manosalvas_Paredes.pdf
- Manzanilla, U., Aguirre, Ó., & Jiménez, J. (2018). *¿Qué es una conífera y cuantas especies existen en el mundo y en México?* (Vol. 10). Recuperado el 28 de agosto de 2019 de https://www.cicy.mx/Documentos/CICY/Desde_Herbario/2018/2018-08-09_Manzanilla-et-al-Que_es_una_conifera_cuantas_especies_existen.pdf
- Marcazzan, G., Vaccaro, S., Valli, G., & Vecchi, R. (2001). Characterisation of PM10 and PM2.5 particulate matter in the ambient air of Milan (Italy). *Atmospheric Environment*. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(01\)00124-8](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(01)00124-8)
- Menéndez, M., & Gil, J. (2003). *Análisis de contribución de fuentes en PM10 y PM2.5 en un área de fondo urbano con influencia de emisiones industriales*. Recuperado el 04 de julio de 2019 de http://www.euskadi.eus/contenidos/documentacion/particulas_abanto/es_doc/adjuntos/2003.pdf

- Mesías, S., Martínez, L., Yohannessen, K., Alvarado, S., Klarián, J., Martín, M., ... Cáceres, D. (2018). Trace element contents in fine particulate matter (PM_{2.5}) in urban school microenvironments near a contaminated beach with mine tailings, Chañaral, Chile. *Environmental Geochemistry and Health*, 40(3), 1077–1091. <https://doi.org/10.1007/s10653-017-9980-z>
- Michael, H., Awad, H., El-Sayed, N., & Paré, P. (2010). Chemical and antioxidant investigations: Norfolk pine needles (*Araucaria excelsa*). *Pharmaceutical Biology*, 48(5), 534–538. <https://doi.org/10.3109/13880200903177503>
- Ministerio de Ambiente Vivivenda y Desarrollo Territorial. (2010). *Manual de diseño de sistemas de vigilancia de la calidad del aire*. Recuperado el 21 de abril de 2019 de <http://www.ideam.gov.co/documents/51310/527391/Protocolo+para+el+Monitoreo+y+seguimiento+de+la+calidad+del+aire.pdf/6b2f53c8-6a8d-4f3d-b210-011a45f3ee88>
- Ministerio del Ambiente. (2010). *Plan Nacional de Calidad del Aire*. Recuperado el 09 de mayo de 2019 de <http://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2012/10/libro-calidad-aire-1-final.pdf>
- Montaño, N., & Sandoval, A. (2007). Contaminación atmosférica y salud. *Ciencia y cultura*, 14(065), 29–33. Recuperado el 05 de mayo de 2019 de <https://www.redalyc.org/pdf/294/29406504.pdf>
- Municipio del Distrito Metropolitano de Quito. (2014a). *Diagnóstico del Territorio del DMQ*. Recuperado el 28 de junio de 2019 de <http://gobiernoabierto.quito.gob.ec/wp-content/uploads/documentos/pdf/diagnosticoterritorio.pdf>
- Municipio del Distrito Metropolitano de Quito. (2014b). *Los Árboles Patrimoniales de Quito*. Recuperado el 06 de agosto de 2019 de http://www.quitoambiente.gob.ec/ambiente/images/Secretaria_Ambiente/Patrimonio_Natural/LIBRO_ARBOLES_PATRIMONIALES

DE_QUITO.pdf

Noriega, P. (2008). *Biomonitoreo de contaminantes mediante el uso de briofitas como muestreadores biológicos para el aire de la Ciudad de Quito*. Recuperado el 16 de octubre de 2019 de [https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/6095/1/Biomonitoreo de contaminantes mediante el uso de briofitas como muestreadores biológicos para el aire de la Ciudad de Quito.pdf](https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/6095/1/Biomonitoreo%20de%20contaminantes%20mediante%20el%20uso%20de%20briofitas%20como%20muestreadores%20biologicos%20para%20el%20aire%20de%20la%20Ciudad%20de%20Quito.pdf)

Nowak, D. (2002). *The effects of urban trees on air quality*. <https://doi.org/10.1111/j.1360-0443.2012.03983.x>

Núñez, H., Narváez, M., Arteaga, J., Mena, P., & Rojas, K. (2009). *Plan maestro de movilidad para el Distrito Metropolitano de Quito*. Recuperado el 27 de marzo de 2019 de https://biblio.flacsoandes.edu.ec/shared/biblio_view.php?bibid=118765&tab=opac

Ogunkunle, C., & Fatoba, P. (2014). Contamination and spatial distribution of heavy metals in topsoil surrounding a mega cement factory. *Atmospheric Pollution Research*, 5(2), 270–282. <https://doi.org/10.5094/APR.2014.033>

Organización Mundial de la Salud. (2005). *Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre*. Recuperado el 21 de diciembre de 2019 de https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/69478/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_spa.pdf;jsessionid=D737CE5CD45B9EDF60BDE612003131EF?sequence=1

Organización Mundial de la Salud. (2014). World Health Organization Data base. Recuperado el 04 de julio de 2019 de <https://www.who.int/airpollution/data/cities/en/>

Organización Mundial de la Salud. (2016). *Ambient air pollution: a global assessment of exposure and burden of disease*. Recuperado el 21 de

abril de 2019 de
<https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/250141/9789241511353-eng.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Organización Mundial de la Salud. (2018). Calidad del aire y salud.
[https://doi.org/10.1016/S2214-109X\(16\)30143-7](https://doi.org/10.1016/S2214-109X(16)30143-7)

Pacyna, J., & Pacyna, E. (2001). An assessment of global and regional emissions of trace metals to the atmosphere from anthropogenic sources worldwide. *Environmental Reviews*, 269–298.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1139/a01-012>

Páez, C. (2012). Gestión de la contaminación atmosférica urbana: El caso de Quito. *Flacso*, 1–17. Recuperado el 05 de mayo de 2019 de <http://www.flacsoandes.edu.ec/web/imagesFTP/10088.ContaminacionQuito.pdf>

Pastrana, M., Wakida, F., Temores, J., Rodriguez, D., García, E., Piñon, T., & Quiñonez, A. (2017). Heavy metal pollution in the soil surrounding a thermal power plant in Playas de Rosarito, Mexico. *Environmental Earth Sciences*, 76(16), 3–9. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6928-7>

Patil, A. R., Darekar, A. B., & Saudagar, R. B. (2013). Araucaria Heterophylla : The Review. *World Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences*, 3(1), 339–345. Recuperado el 15 de septiembre de 2019 de https://storage.googleapis.com/journal-uploads/wjpps/article_issue/1475218438.pdf

Pérez, F. (2018). *Integración test de módulos de medición de partículas PM2.5 y PM10 para la valoración de la calidad del aire*. Recuperado el 18 de junio de 2019 de http://oa.upm.es/50268/1/TFG_FRANCISCO_PEREZ_MAQUIEIRA.pdf

Petek, A., Masanet, E., Horvath, A., & Stadel, A. (2014). Life-cycle inventory analysis of concrete production: A critical review. *Cement and Concrete*

Composites, 51, 38–48.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.03.005>

Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. (2014). *Plan de Acción Regional de Cooperación Intergubernamental en materia de Contaminación Atmosférica para América Latina y el Caribe*. Recuperado el 03 de agosto de 2019 de http://www.pnuma.org/forodeministros/19-mexico/documentos/decisiones/Contaminacion_Atmosferica/Decision_Contaminacion_atmosferica.pdf

Quijano, A., Quijano, M., & Henao, J. (2010). Caracterización fisicoquímica del material particulado fracción respirable PM_{2.5} en Pamplona-Norte de Santander-Colombia. *Revista de la Facultad de Ciencias Básicas*, 8(1), 1–20. Recuperado el 01 de noviembre de 2019 de <https://www.redalyc.org/pdf/903/90315226007.pdf>

Rahmatizadeh, S., & Motesaddi, S. (2005). *Monitoring of air quality (in Tehran) by analyzing spatio-temporal data*. Recuperado el 19 de abril de 2019 de https://www.researchgate.net/publication/326551255_Monitoring_of_Air_Quality_in_Tehran_by_Analyzing_Spatio-Temporal_Data

Ramírez, O., Sánchez, A., Amato, F., Moreno, T., Silva, L., & De la Rosa, J. (2019). Physicochemical characterization and sources of the thoracic fraction of road dust in a Latin American megacity. *Science of the Total Environment*, 652, 434–446.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.214>

Ramírez, O., Sánchez, A., & De la Rosa, J. (2018). Characteristics and temporal variations of organic and elemental carbon aerosols in a high-altitude, tropical Latin American megacity. *Atmospheric Research*, 210, 110–122. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.04.006>

Raysoni, A., Armijos, R., Weigel, M., Echanique, P., Racines, M., Pingitore., N., & Li, W. (2017). Evaluation of sources and patterns of elemental

composition of PM_{2.5} at three low-income neighborhood schools and residences in Quito, Ecuador. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(7), 1–26. <https://doi.org/10.3390/ijerph14070674>

Reyes, Y., Vergara, I., Torres, O., Díaz, M., & González, E. (2016). Contaminación por metales pesados: implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. *Revista Ingeniería, Investigación y Desarrollo*, 16(2), 66–77. <https://doi.org/10.1007/BF02796157>

Rojas, L., & Garibay, V. (2009). Las partículas suspendidas, aeropartículas o aerosoles: ¿hacen daño a la salud?; ¿podemos hacer algo?. *Gaceta Ecológica*, (69), 29–44. Recuperado el 19 de octubre de 2019 de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2884407>

Romero, M., Diego, F., & Alvarez, M. (2006). La contaminación del aire: su repercusión como problema de salud. *Higiene y epidemiología*, 44, 1–14. Recuperado el 15 de febrero de 2019 de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1561-30032006000200008

Rosales, J., Torres, V., Olaiz, G., & Borja, V. (2006). Los efectos agudos de la contaminación del aire en la salud de la población: Evidencias de estudios epidemiológicos. *Red Salud Pública de México*, 43, 544–555. <https://doi.org/10.1590/s0036-36342001000600005>

Rossini, S., & Fernández, A. (2007). Monitoring of heavy metals in topsoils, atmospheric particles and plant leaves to identify possible contamination sources. *Microchemical Journal*, 86(1), 131–139. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2007.01.003>

Ruiz, A. (2009). Herramientas Estadísticas-Comparación De Más De Dos Muestras : Anova (Parte I). Recuperado el 05 de noviembre de 2019 de <http://web.cortland.edu/matresearch/ANOVA-I.pdf>

- Sawidis, T., Breuste, J., Mitrovic, M., Pavlovic, P., & Tsigaridas, K. (2011). Trees as bioindicator of heavy metal pollution in three European cities. *Environmental Pollution*, 159(12), 3560–3570. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.08.008>
- Sawidis, T., Marnasidis, A., Zachariadis, G., & Stratis, J. (1995). A study of air pollution with heavy metals in Thessaloniki city (Greece) using trees as biological indicators. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 28(1), 118–124. <https://doi.org/10.1007/BF00213976>
- Sbarato, D., Basan, R., Manzo, P., Ortega, J., Campos, M., & Salort, M. (2000). *Análisis y Caracterización del Material Particulado Atmosférico* (Universidad Nacional de Córdoba). Recuperado el 19 de octubre de 2019 de <http://www.monitoreoambiental.com/download/16>. Análisis del Material Particulado-paper24.pdf
- Sbarato, D., & Sbarato, V. (2006). *Contaminación del aire*. Recuperado el 22 de julio de 2019 de <https://ebookcentral.proquest.com/lib/udlasp/reader.action?docID=3192312&query=material%2Bparticulado>
- Secretaría de Ambiente. (2016). Red de Monitoreo Atmosférico. Recuperado el 05 de mayo de 2019 de Políticas y Planeación Ambiental website: <http://www.quitoambiente.gob.ec/ambiente/index.php/politicas-y-planeacion-ambiental/red-de-monitoreo>
- Secretaría de Ambiente. (2017). *Informe de la calidad de aire - 2016*. Recuperado el 22 de julio de 2019 de http://www.quitoambiente.gob.ec/ambiente/images/Secretaria_Ambiente/red_monitoreo/informacion/ICA2016.pdf
- Secretaría de Territorio Hábitat y Vivienda. (s/f). Plan de Uso y Ocupación del Suelo. Recuperado el 28 de junio de 2019 de <https://www.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=47ccc16154584d458d7e657dba576855>

- Silva, J., Rojas, J., Norabuena, M., Molina, C., Toro, R., & Leiva, M. (2017). Particulate matter levels in a South American megacity: the metropolitan area of Lima-Callao, Peru. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189(12). <https://doi.org/10.1007/s10661-017-6327-2>
- Smichowski, P., Gómez, D., Dawidowski, L., Giné, M., Sánchez, A., & Reich, S. (2004). Monitoring trace metals in urban aerosols from Buenos Aires city. Determination by plasma-based techniques. *Journal of Environmental Monitoring*, 6(4), 286–294. <https://doi.org/10.1039/b312446k>
- Sun, F., Wen, D., Kuang, Y., Li, J., Li, J., & Zuo, W. (2010). Concentrations of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in needles of Masson pine (*Pinus massoniana* L .) growing nearby different industrial sources. *Journal of Environmental Sciences*, 22(7), 1006–1013. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(09\)60211-4](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(09)60211-4)
- Texto Unificado de Legislación Secundaria, Anexo IV. Registro Oficial Edición Especial 387 de 04 de noviembre de 2015.*
- Tomashuk, T., Truong, T., Mantha, M., & McGowin, A. (2012). Atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbon profiles and sources in pine needles and particulate matter in Dayton, Ohio, USA. *Atmospheric Environment*, 51, 196–202. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.01.028>
- Turkyilmaz, A., Sevik, H., & Cetin, M. (2018). The use of perennial needles as biomonitors for recently accumulated heavy metals. *Landscape and Ecological Engineering*, 14(1), 115–120. <https://doi.org/10.1007/s11355-017-0335-9>
- U.S. Environmental Protection Agency. (1999). Determination of metals in ambient particulate matter using inductively coupled plasma (ICP) spectroscopy. En *Compendium of Methods for the Determination of Inorganic Compounds in Ambient Air, Compendium Method IO-3.4*. Recuperado el 15 de septiembre de 2019 de <http://www.epa.gov/ttn/amtic/files/ambient/inorganic/mthd-3-4.pdf>

- U.S. Environmental Protection Agency. (2019). *Policy Assessment for the Review of the Particulate Matter National Ambient Air Quality Standards for Particulate Matter, External Review Draft*. Recuperado el 21 de diciembre de 2019 de https://www.epa.gov/sites/production/files/2019-09/documents/draft_policy_assessment_for_pm_naaqs_09-05-2019.pdf
- Universidad de La Salle. (2017). Propuesta de una estrategia periódica de caracterización fisicoquímica de material particulado para la ciudad de Bogotá con el fin de contribuir en la gestión de la calidad del aire. En *Descripción y manejo de Hi-Vol Y Low-Vol*. Recuperado el 01 de noviembre de 2019 de http://repository.lasalle.edu.co/bitstream/handle/10185/22401/41122127_2017_P5.pdf?sequence=5&isAllowed=y&fbclid=IwAR0klz88Xmf4cVtUqp1P4Pz2vNNvVcK5cg_zTL7ZC_H-2SATzqYkv5qfM5k
- Vasconcellos, P., Souza, D., Ávila, S., Araújo, M., Naoto, E., Nascimento, K., ... Behrentz, E. (2011). Comparative study of the atmospheric chemical composition of three South American cities. *Atmospheric Environment*, 45(32), 5770–5777. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.07.018>
- Viana, M., Kuhlbusch, T., Querol, X., Alastuey, A., Harrison, R., Hopke, P., ... Hitzengerger, R. (2008). Source apportionment of particulate matter in Europe: A review of methods and results. *Journal of Aerosol Science*, 39(10), 827–849. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2008.05.007>
- Weng, Q. (2010). *Remote Sensing and GIS Integration: Theories, Methods, and Applications*. Recuperado el 22 de julio de 2019 de [https://books.google.com.ec/books?id=VtXSBy4-UH0C&printsec=frontcover&dq=Weng,+Q.+\(2010\).+Remote+sensing+and+GIS+integration:+theories,+methods,+and+applications+libro&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwjJtPqWpf7kAhVQrlkKHaajAaAQ6AEIJzAA#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.ec/books?id=VtXSBy4-UH0C&printsec=frontcover&dq=Weng,+Q.+(2010).+Remote+sensing+and+GIS+integration:+theories,+methods,+and+applications+libro&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwjJtPqWpf7kAhVQrlkKHaajAaAQ6AEIJzAA#v=onepage&q&f=false)
- Zabalza, J., Ogulei, D., Hopke, P., Lee, J., Hwang, I., Querol, X., ...

Santamaría, J. (2006). Concentration and sources of PM₁₀ and its constituents in Alsasua, Spain. *Water, Air, and Soil Pollution*, 174(1–4), 385–404. <https://doi.org/10.1007/s11270-006-9136-8>

Zalakeviciute, R., Rybarczyk, Y., Granda, M., Díaz, M., & Alexandrino, K. (2020). Chemical characterization of urban PM₁₀ in the Tropical Andes. *Atmospheric Pollution Research*, (July), 0–1. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2019.11.007>

Zalakeviciute, R., Rybarczyk, Y., López, J., & Diaz, M. (2018). Quantifying decade-long effects of fuel and traffic regulations on urban ambient PM_{2.5} pollution in a mid-size South American city. *Atmospheric Pollution Research*, 9(1), 66–75. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2017.07.001>

ANEXOS

Anexo 1: Glosario de términos

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Al: Aluminio

ANOVA: Análisis de Varianza

Ca: Calcio

Cd: Cadmio

Co: Cobalto

CO: Monóxido de carbono

CORPAIRE: Corporación para el Mejoramiento del Aire de Quito

Cr: Cromo

Cu: Cobre

DMQ: Distrito Metropolitano de Quito

ECH: Empresa de Desarrollo del Centro Histórico

Fe: Hierro

Hi-Vol: Muestreador de Alto Volumen

ICP-MS: Espectroscopía de Masas por Plasma de Acoplamiento Inductivo

ICP-OES: Espectroscopía de Emisión Óptica por Plasma de Acoplamiento Inductivo

INABIO: Instituto Nacional de Biodiversidad

K: Potasio

Mg: Magnesio

Mn: Manganeseo

Na: Sodio

NECA: Norma Ecuatoriana de Calidad del Aire

Ni: Níquel

NO₂: Dióxido de nitrógeno

O₃: Ozono

OMS: Organización Mundial de la Salud

Pb: Plomo

PCA: Análisis de Componentes Principales

PM: Material particulado

PM_{0.1}: Material particulado con diámetros aerodinámicos ≤ 0.1 micrómetros

PM_{2.5}: Material particulado con diámetros aerodinámicos ≤ 2.5 micrómetros

PM₁₀: Material particulado con diámetros aerodinámicos ≤ 10 micrómetros

RAUTO: Red Automática

REDEP: Red de Depósito

REMMAQ: Red Metropolitana de Monitoreo Atmosférico

S: Azufre

SO₂: Dióxido de azufre

Sr: Estroncio

V: Vanadio

Zn: Zinc

Anexo 2: Métodos de medición de contaminantes

1. Muestreo pasivo

El muestreo pasivo es un método eficiente de monitoreo del aire, ya que es económico de modo que se pueden muestrear muchas ubicaciones a un precio razonable y no requiere suministro de energía (Abdulaziz, Al-Nadji, Kadri, & Kakosimos, 2017), sino que dependen de las fuerzas físicas de deposición, intercepción y atracción para recolectar y retener contaminantes (Einstein et al., 2012). Tradicionalmente, los muestreadores pasivos se han utilizado para medición de gases y vapores orgánicos, aunque también se puede utilizar con partículas, principalmente en entornos ocupacionales donde las concentraciones son mucho más altas, y no está claro si serían adecuados a niveles ambientales típicos (Beamer et al., 2014). Sin embargo, la desventaja más importante que presenta esta técnica es que la eficiencia de recolección y la velocidad de deposición están determinadas por las condiciones ambientales que no están bajo control, lo que implica además, que la forma de la muestra puede tener un impacto fuerte y variable de las propiedades de la colección. Además, pueden necesitar un tiempo de muestreo largo necesario para recolectar suficientes partículas (Waza et al., 2019).

2. Muestreo activo

A diferencia del muestreo pasivo, el muestreo activo demanda electricidad para absorber el aire del ambiente y hacerlo pasar a través de un medio físico o químico para medir tanto gases como partículas. Mediante esta metodología es posible conseguir mediciones diarias promedio, debido a que el volumen complementario de aire que ingresa al equipo aumenta la sensibilidad del mismo. Uno de los exponentes más comúnmente utilizados para el muestreo activo de partículas es el Muestreador de Alto Volumen (Instituto Nacional de Ecología, n.d.).

3. Analizadores automáticos (monitores)

Los monitores automáticos son equipos de análisis en línea y en tiempo real que basan su funcionamiento en el uso de métodos electro ópticos, como: absorción UV, infrarrojo no dispersivo, fluorescencia y quimiluminiscencia (Ministerio de Ambiente Vivivenda y Desarrollo Territorial, 2010). Esta

herramienta de alta sensibilidad y resolución (Rahmatizadeh & Motesaddi, 2005) mide las propiedades físico químicas de los gases a través de un detector que emite una señal eléctrica proporcional a la concentración del contaminante presente (Cano & Delgado, n.d.). Esta técnica se aplica especialmente en ocasiones donde se requiere una respuesta rápida. Así, por ejemplo, en episodios de alerta en los que se presenten elevados niveles de contaminación y se necesite conocer dichos valores para aplicar medidas inmediatas. De igual modo, se utilizan para precisar planes y estrategias de prevención y control de la contaminación (Jiménez, 2007).

4. Sensores remotos

Este método permite la recopilación de información a través de dispositivos de teledetección, sin la necesidad de tomar muestras o entrar en contacto directo con los objetos o eventos observados (Weng, 2010). Actualmente, los sensores remotos constituyen una metodología aplicada eficientemente en el monitoreo de la contaminación del aire (Trinh, 2016). De hecho, se conocen varias aplicaciones especializadas en este campo, como en análisis de las inmediaciones de las fuentes de emisión, en columnas de humo emitidas por la chimeneas, y en mediciones verticales de contaminantes en la atmósfera (Galán, 2013).

Estos equipos utilizan técnicas espectroscópicas de largo recorrido con el objetivo de obtener en tiempo real las mediciones multicomponentes de todos los contaminantes atmosféricos (DIGESA, 2005). Generalmente, se ubican en plataformas cercanas al lugar de interés, pero también se pueden colocar en aviones o en satélites (Lim, MatJafri, Abdullah, & Wong, 2009). Entre las ventajas que presentan los sensores remotos, cabe señalar el alcance de la medición, ya que comprende trayectorias o áreas amplias de estudio; la calidad homogénea y los intervalos cortos de revisión (Somvanshi, Vashisht, Chandra, & Kaushik, 2019). Sin embargo, también implica desventajas como la limitada resolución espacial y temporal, la complejidad de su uso, los elevados costos, las dificultades en la validación de los datos y en la calibración (Jiménez, 2007). Para obtener el máximo beneficio de esta técnica, se puede acoplar los datos

obtenidos mediante los datos satelitales con la información del monitoreo terrestre (Veefkind et al., 2007).

5. Bioindicadores

La palabra "bioindicador", fue utilizada por primera vez en el año 1920 por el botánico y ecologista americano Frederic Clements (Stankovic & Stankovic, 2013), y hace referencia a la técnica de análisis ambiental que consiste en el empleo de seres vivos para identificar los contaminantes que afectan la calidad del ambiente y las condiciones actuales ecosistema (Giacobone & Cabrera, 2009). Los indicadores biológicos pueden ser clasificados como activos, cuando se introduce un individuo dentro de un ecosistema con el objetivo de obtener información del sector, y pasivos si el organismo en estudio ya se encuentra en el medio (Jiménez, 2007). Cabe señalar que las características que debe presentar un bioindicador para ser empleado como tal, son: suficiente capacidad para acumular elevados niveles de contaminantes, amplia distribución en el área de estudio, ciclo de vida larga para efectuar comparaciones, accesibilidad para el muestreo repetitivo, fácil identificación y densidad poblacional local alta (Zhou, Zhang, Fu, Shi, & Jiang, 2008).

Los bioindicadores son utilizados para contribuir en el monitoreo del ambiente, de los procesos ecológicos y de la biodiversidad, aunque también se emplean en pruebas toxicológicas de laboratorio para determinar el riesgo al que se enfrentan las personas (Daniels, 2015). Particularmente en los países en vías de desarrollo y en zonas remotas, la forma más adecuada y rentable para determinar la contaminación del aire es el uso de hojas de los árboles como bioindicadores (Fasani et al., 2016). Dentro de este método se utilizan varios enfoques de análisis con diferente grado de complejidad y desarrollo, estos son: la valoración del impacto de los contaminantes en el aspecto y en el metabolismo de las plantas; el aprovechamiento de la capacidad que tienen las plantas para recibir y almacenar contaminantes o sus metabolitos en los tejidos; y la disposición y evaluación de determinadas plantas como bioindicadores de la calidad atmosférica (Galán, 2013).

Anexo 3: Informe de identificación taxonómica

INSTITUTO NACIONAL DE BIODIVERSIDAD
HERBARIO NACIONAL DEL ECUADOR (QCNE)
Dir.: Avenida Río Coca, E6-115 e Isla Fernandina. Telf.: (593-2) 2441-592

INFORME DE IDENTIFICACIÓN TAXONÓMICA

SOLICITANTE: Yasser Alejandro González, MSc.

FECHA: 11 de febrero de 2020

LOCALIDAD	FAMILIA	ESPECIE
Belisario	Araucariaceae	<i>Araucaria heterophylla</i> (Salisb.) Franco
Tababela	Araucariaceae	<i>Araucaria heterophylla</i> (Salisb.) Franco
Los Chillos	Araucariaceae	<i>Araucaria heterophylla</i> (Salisb.) Franco

OBSERVACIONES

Distribución:

Origen: Introducido y cultivado en la Costa y Andes de Ecuador.

Distribución mundial: Belize, Bolivia, El Salvador, Hawái, Japón, Tanzania, Estados Unidos.

Taxonómicas:

Nombre aceptado: *Araucaria heterophylla* (Salisb.) Franco

Sinónimos: *Araucaria araucana* (Molina) K. Koch, *Araucaria excelsa* (Lamb.) R. Br., *Eutassa heterophylla* Salisb.

Total de muestras botánicas identificadas: 3 muestras botánicas.

Fuente para identificación, nomenclatura e información:

1. Especímenes botánicos conservados en el Herbario QCNE del INABIO
2. <http://www.tropicos.org>.
3. Catalogue of the Vascular Plants of Ecuador 1999.

Identificación realizada por: Dra. Diana Fernández, Curadora-Investigadora del INABIO

Firma:



Anexo 4: Tablas de concentración de metales en los filtros de material particulado PM₁₀ de las estaciones de monitoreo en estudio

Tabla A4.1: Concentración de metales en el material particulado PM10 en la estación de monitoreo Belisario (ug/m3)

Fecha	Concentración PM10 (ug/m3)											Concentraciones (ug/m ³)										
	Cd	Cr	Cu	K	Mn	Ni	Pb	Sr	Zn	Ca	Fe	Al	Na	Mg	V	S						
01/01/2017	0.0081	1.1583	0.2621	2.7828	0.0688	0.0027	0.0649	0.1652	0.1767	8.9186	0.5359	0.3607	121.493	2.5691	ND	ND						
19/01/2017	0.0006	0.0484	0.0484	0.8989	0.0294	0.0019	0.0391	0.0339	0.2993	7.2967	0.5104	0.3650	5.3699	1.6301	0.0065	1.6906						
18/02/2017	0.0024	0.0041	0.0509	0.3057	0.0287	0.0016	0.0263	0.0269	0.0777	5.9598	0.5430	0.2556	4.4067	1.3781	0.0029	1.9103						
24/02/2017	0.0046	0.2967	0.1894	0.7196	0.0688	0.0180	0.0238	0.0808	0.1832	7.9653	0.4289	0.2227	6.3170	1.9156	ND	ND						
08/03/2017	0.0010	0.0044	0.0428	0.2162	0.0212	0.0009	0.0102	0.0163	0.3683	3.4395	0.3683	0.2647	3.5277	0.0081	0.0081	1.7290						
14/03/2017	0.0043	0.0905	0.1594	0.5780	0.0493	0.0124	0.0161	0.0683	0.1640	8.8929	0.2610	0.1609	4.8470	1.6652	ND	ND						
13/04/2017	0.0056	0.1389	0.2685	0.7146	0.0643	0.0097	0.0257	0.1099	0.2549	8.5918	0.3817	0.5962	3.5693	2.0388	ND	ND						
25/04/2017	0.0004	0.0025	0.0258	0.2108	0.0261	0.0013	0.0046	0.0217	0.0191	6.8493	0.2793	0.1717	3.0650	1.1902	0.0109	2.3076						
19/05/2017	0.0007	0.0247	0.0247	0.2410	0.0236	0.0012	0.0006	0.0217	0.0331	4.8881	0.4231	0.2777	1.9177	1.9022	0.0068	1.9079						
25/05/2017	0.0047	0.0338	0.2267	0.8940	0.0630	0.0057	0.0252	0.0863	0.4318	7.9502	0.4201	0.2927	3.7681	1.8969	ND	ND						
12/06/2017	0.0056	0.0273	0.1134	0.5197	0.0485	0.0092	0.0126	0.0560	0.1368	5.7257	0.2529	0.3136	2.8480	1.3557	ND	ND						
24/06/2017	0.0029	0.0342	0.3434	0.0315	0.0315	0.0018	0.0046	0.0295	0.1541	7.8975	0.3317	0.3103	3.6711	1.8690	0.0021	2.5641						
12/07/2017	0.0141	0.0890	0.2246	3.2081	0.0459	0.1268	0.0837	0.1389	0.2360	6.2162	0.2224	0.2637	2.7296	1.6011	ND	ND						
18/07/2017	0.0005	0.0060	0.0421	0.2721	0.0311	0.0003	0.0007	0.0327	0.0305	7.6684	0.4476	0.3567	5.0311	1.7835	0.0052	0.9835						
17/08/2017	0.0006	0.0047	0.0235	0.4131	0.0422	ND	0.0026	0.0444	0.1657	7.5672	0.5104	0.2786	4.9197	2.7258	0.0066	1.2493						
23/08/2017	0.0007	0.0026	0.0415	0.3942	0.0349	0.0003	0.0057	0.0347	0.0309	8.6379	0.3062	0.2736	5.1055	1.9301	0.0024	1.4477						
22/09/2017	0.0008	0.0040	0.0415	0.4926	0.0421	0.0003	0.0023	0.0437	0.0244	9.7566	0.6246	0.6351	5.2181	1.8524	0.0166	2.4547						
28/09/2017	0.0007	0.0050	0.0599	0.3917	0.0321	0.0024	0.0124	0.0340	0.0545	7.7227	0.6508	0.5712	4.7342	1.7694	0.0172	2.3069						
16/10/2017	0.0012	0.0045	0.0270	0.5464	0.0418	0.0019	0.0008	0.0414	0.2617	11.2196	0.9816	1.0459	5.5687	2.1924	0.0042	1.8332						
22/10/2017	0.0010	0.0039	0.0480	0.4255	0.0427	0.0047	0.0120	0.0487	0.0412	11.1848	0.3847	0.3818	5.9677	2.6736	0.0088	1.7569						
19/01/2018	0.0049	0.0069	0.1782	0.9604	0.0643	0.0159	ND	0.0802	0.0782	10.6852	0.7186	4.0685	6.3152	2.9664	0.0096	3.4403						
25/01/2018	0.0056	0.0118	0.2256	0.9921	0.0774	0.0229	ND	0.0954	0.0528	11.9630	0.6953	5.2201	7.5053	3.5972	0.0094	3.2241						
06/02/2018	0.0054	0.0075	0.1129	0.6318	0.0355	0.0134	ND	0.0513	0.0325	5.7435	0.4118	2.3597	3.6937	1.6029	0.0061	2.5277						
24/02/2018	0.0053	0.0071	0.1222	0.8524	0.0613	0.0169	ND	0.0799	0.1897	10.3302	0.4943	4.3206	6.5061	3.0259	0.0087	2.5793						
14/03/2018	0.0061	0.0019	0.0903	0.7977	0.0449	0.0130	ND	0.0540	0.0408	6.2417	0.7214	3.8007	4.0734	1.7456	0.0131	2.4290						
20/03/2018	0.0128	0.0112	0.1447	0.6972	0.0553	0.0502	0.0060	0.0649	0.0938	7.2688	0.7288	3.4382	4.9038	2.1093	0.1867	5.0467						
13/04/2018	0.0515	0.0688	0.1304	0.9122	0.0647	0.0171	0.0191	0.0777	0.0786	8.6808	0.8187	4.0200	5.8247	2.6073	0.0116	3.4236						
19/04/2018	0.2848	0.0663	0.1278	0.6182	0.0478	0.0143	0.0924	0.0491	0.0601	6.4961	0.6148	2.8291	3.9804	1.7774	0.0111	1.6964						
07/05/2018	0.1333	0.0051	0.1878	0.8759	0.0536	0.0156	ND	0.0826	0.0945	8.5312	0.6267	3.6529	5.4165	2.3728	0.0134	2.7796						
31/05/2018	0.0940	0.0123	0.3176	1.2147	0.0755	0.0175	0.0201	0.1036	0.1080	11.6269	0.8514	4.5330	7.1338	3.3063	0.0108	2.9750						
06/06/2018	0.0800	0.0084	0.1419	1.1693	0.0909	0.0150	0.0863	0.1200	0.0545	14.6129	0.6711	6.9991	9.2465	4.3111	0.0111	2.8165						
18/06/2018	0.1126	0.0069	0.0983	1.0351	0.0981	0.0150	ND	0.1229	0.0980	16.5275	0.7366	6.4864	9.2844	4.4194	0.0116	1.6728						
06/07/2018	0.0014	0.0097	0.0325	0.6259	0.0284	0.0014	ND	0.0283	0.0671	5.3768	0.2638	2.3895	5.0154	0.9779	0.0041	1.2047						
18/07/2018	0.0014	0.0111	0.0380	0.4482	0.0422	ND	ND	0.0284	0.0450	6.7215	0.4551	0.3728	2.8174	1.2714	0.0042	1.0161						
17/08/2018	0.0207	0.0097	0.0380	0.5254	0.0491	ND	ND	0.0359	0.0276	7.6253	0.3201	0.3325	3.7598	1.4627	0.0028	0.7106						
23/08/2018	0.2005	0.0097	0.0401	0.4161	0.0498	ND	ND	0.0345	0.0436	7.6340	0.4098	0.4519	3.3098	1.3901	0.0042	1.1146						
10/09/2018	0.0533	0.0090	0.0401	0.5113	0.0574	0.0014	ND	0.0353	0.0547	8.2988	0.3791	0.4511	4.2104	1.6140	0.0042	1.0633						
22/09/2018	0.0492	0.0139	0.0353	0.3763	0.0326	ND	ND	0.0229	0.0395	5.5525	0.3001	0.2613	2.1532	1.0555	0.0042	0.6501						
04/10/2018	0.0408	0.0118	0.0381	0.6457	0.0408	0.0118	ND	0.0305	0.0498	6.4410	0.5336	2.7987	5.7586	1.1391	0.0436	1.9135						
22/10/2018	0.1316	0.0076	0.0420	1.3245	0.0475	0.0158	ND	0.0372	0.0875	8.1159	0.5603	3.8171	8.2297	1.5071	0.0379	2.3677						
03/11/2018	0.0590	0.0086	0.0419	0.4250	0.0378	0.0069	ND	0.0288	0.0316	6.3167	0.2121	0.2176	3.0743	1.2062	0.0185	1.8625						
27/11/2018	0.0130	0.0103	0.0417	0.5999	0.0541	0.0014	ND	0.0349	0.0582	9.0045	0.3669	0.2019	3.5023	1.7159	0.0041	1.3271						
03/12/2018	0.0041	0.0082	0.0405	0.7876	0.0598	0.0014	ND	0.0405	0.0495	10.3034	0.4611	0.4144	4.0497	2.0053	0.0055	1.6452						
21/12/2018	0.0985	0.0055	0.0544	0.7934	0.0599	0.0186	ND	0.0337	0.1412	8.5375	0.6453	0.5234	3.3098	1.6012	0.0434	1.9331						

Nota: ND se refiere a los valores no detectados

Tabla A4.2: Concentración de metales en el material particulado PM10 en la estación de monitoreo Los Chillos (ug/m3)

Fecha	Concentración PM10 (ug/m3)											Concentraciones (ug/m ³)										
	Cd	Cr	Cu	K	Mn	Ni	Pb	Sr	Zn	Ca	Fe	Al	Na	Mg	V	S						
01/01/2017	0.0051	0.0238	0.0230	0.6281	0.0891	0.0178	0.0444	0.0656	0.2784	7.4560	0.2746	ND	3.2555	1.8419	ND	ND						
19/01/2017	0.0004	0.0040	0.0312	0.3299	0.0201	0.0033	0.0096	0.0178	0.2008	3.3577	0.2602	0.2620	3.3996	0.8213	0.0104	0.9908						
18/02/2017	0.0016	0.0041	0.0742	0.3006	0.0354	0.0092	0.0365	0.0274	0.1130	6.4936	0.3997	0.2799	4.7991	1.5261	0.0251	2.0569						
24/02/2017	0.0051	0.0175	0.4533	0.7278	0.0455	0.0127	0.0633	0.0553	0.1925	6.2195	0.1452	0.0000	8.2837	1.5372	ND	ND						
08/03/2017	0.0004	0.0146	0.1222	0.2379	0.0215	0.0020	0.0081	0.0234	0.0487	5.7188	0.1566	0.1425	3.8457	1.3280	0.0030	1.8065						
14/03/2017	0.0058	0.0236	0.1875	0.7396	0.0436	0.0254	0.1079	0.0616	0.1804	5.8067	0.4602	0.0256	3.2542	1.3914	ND	ND						
13/04/2017	0.0039	0.0282	0.2435	0.3274	0.0320	0.0128	0.0377	0.0385	0.1240	8.9467	0.4766	1.0260	3.7752	2.1860	ND	ND						
25/04/2017	0.0006	0.0043	0.0576	0.2772	0.0261	0.0031	0.0088	0.0246	0.0578	5.4891	0.2812	0.1953	4.0242	1.3642	0.0129	2.0473						
19/05/2017	0.0010	0.0216	0.1177	0.3161	0.0330	0.0078	0.0235	0.0282	0.0789	6.3712	0.3512	0.2221	3.1726	1.5496	0.0124	1.6440						
25/05/2017	0.0008	0.0061	0.4806	0.3977	0.0167	0.0047	0.0065	0.0265	0.1980	6.3751	0.1920	1.6745	3.4187	1.5416	ND	ND						
12/06/2017	0.0001	0.0007	0.0099	0.0444	0.0036	0.0009	0.0025	0.0034	0.0105	0.8286	0.0720	0.2270	0.4625	0.1979	ND	ND						
24/06/2017	0.0031	0.0031	0.4491	0.3226	0.0249	0.0031	0.0201	0.0247	0.1677	6.5353	0.5418	0.3791	3.3030	1.4599	0.0105	2.7066						
12/07/2017	0.0029	0.0084	0.2348	0.7884	0.0181	0.0074	0.0163	0.0354	0.1007	5.6260	0.3673	1.8843	2.5651	1.3746	ND	ND						
18/07/2017	0.0008	0.0046	0.0712	0.4182	0.0478	0.0042	0.0165	0.0430	0.0468	9.2037	0.7845	0.7195	6.4274	2.2167	0.0127	1.1570						
17/08/2017	0.0009	0.0039	0.0390	0.2666	0.0322	0.0020	0.0097	0.0284	0.0330	6.9061	0.3714	0.2203	4.4614	1.4825	0.0122	2.2348						
23/08/2017	0.0003	0.0031	0.8636	0.3724	0.0358	0.0045	0.0124	0.0331	0.0347	7.1643	0.3784	0.3613	4.8955	1.7092	0.0059	1.3673						
22/09/2017	0.0009	0.0045	0.0598	0.5628	0.0485	0.0024	0.0085	0.0431	0.0533	9.2923	0.6523	0.6778	5.4588	2.1127	0.0092	1.4858						
28/09/2017	0.0007	0.0027	0.0517	0.4843	0.0337	0.0025	0.0290	0.0307	0.0516	6.6482	0.4195	0.4241	4.4218	1.5086	0.0598	2.2802						
16/10/2017	0.0005	0.0033	0.0364	0.2859	0.0321	0.0002	0.0038	0.0333	0.0305	8.9390	0.3235	0.2722	5.4763	2.0327	0.0038	0.9125						
22/10/2017	0.0011	0.0082	0.2160	0.3518	0.0395	0.0056	0.0117	0.0337	0.0557	7.6693	0.3526	0.4074	4.6690	1.9116	0.0243	1.5813						
19/01/2018	0.0065	0.0293	0.1612	0.9140	0.0689	0.0178	ND	0.0813	0.0337	10.4568	0.3638	4.9338	7.2672	3.0968	0.0094	3.1479						
25/01/2018	0.0056	0.0088	0.1477	0.8291	0.0570	0.0279	ND	0.0638	0.1103	8.0246	0.7494	3.8279	5.3135	1.8156	0.0096	2.7785						
06/02/2018	0.0062	0.0063	0.1388	0.7705	0.0457	0.0116	ND	0.0602	0.0193	7.5347	0.2622	3.7608	5.4203	1.7464	0.0079	2.3448						
24/02/2018	0.0053	0.0038	0.1729	0.7101	0.0359	0.0115	ND	0.0610	0.0224	6.3960	0.1767	2.8560	4.5928	1.8660	0.0062	2.1524						
14/03/2018	0.0098	0.0027	0.1467	1.7300	0.0801	0.0099	0.0190	0.1044	0.1756	6.1432	1.2233	4.6800	6.7945	3.1276	0.0656	4.2711						
20/03/2018	0.0121	0.0106	0.1368	0.6590	0.0523	0.0474	0.0056	0.0614	0.0866	6.8693	0.6889	3.2495	4.6348	1.9936	0.1765	4.7699						
13/04/2018	0.0209	0.0109	0.1053	1.1291	0.0736	0.0153	0.0168	0.0510	0.2481	9.1024	0.7783	3.7268	6.2062	2.5936	0.0329	3.2241						
19/04/2018	0.0211	0.0072	0.0833	0.7778	0.0530	0.0214	0.0658	0.0631	0.0789	7.2685	0.6909	3.1704	4.4304	2.0700	0.0270	2.0638						
07/05/2018	0.0276	0.0011	0.0783	0.6635	0.0442	0.0148	ND	0.0684	0.0614	6.9080	0.3159	2.6084	4.4736	2.1874	0.0142	2.0624						
31/05/2018	0.0203	0.0079	0.1407	1.0965	0.0680	0.0251	0.0088	0.1151	0.1999	8.3210	0.4874	3.2421	6.2862	2.7952	0.0374	3.0899						
06/06/2018	0.0299	0.0056	0.1094	1.2036	0.0966	0.0243	0.0496	0.1149	0.0780	12.7787	0.7518	5.9306	9.2078	3.7674	0.0229	3.0342						
18/06/2018	0.0298	0.0070	0.0955	1.1809	0.0937	0.0215	ND	0.1184	0.5331	13.2786	0.7978	6.1170	9.4822	3.9382	0.0245	3.1198						
06/07/2018	0.0050	0.0063	0.0405	0.6903	0.0445	0.0040	ND	0.0345	0.0658	7.5900	0.4384	3.8357	7.8887	1.4037	0.0120	1.2875						
16/07/2018	0.0219	0.0087	0.0312	0.6249	0.0518	0.0027	ND	0.0346	0.0326	8.1603	0.4627	0.5368	3.5252	1.5635	0.0093	1.3280						
17/08/2018	0.0206	0.0060	0.0405	0.4925	0.0365	ND	ND	0.0239	0.0478	5.5972	0.4727	0.4952	2.1415	1.0450	0.0080	0.6746						
23/08/2018	0.1673	0.0066	0.0392	0.5578	0.0578	0.0053	ND	0.0159	0.0199	8.3210	0.4874	0.5877	4.0476	1.5845	0.0093	1.0167						
10/09/2018	0.0633	0.0060	0.0367	0.4958	0.0407	0.0013	ND	0.0253	0.0540	6.3407	0.5205	0.5651	2.4386	1.2036	0.0060	0.9230						
22/09/2018	ND	0.0180	0.0400	0.4516	0.0313	0.0040	ND	0.0193	0.0519	4.1828	0.4123	0.4010	1.7985	0.7752	0.0113	0.8153						
04/10/2018	0.0950	0.0083	0.0525	0.7206	0.0538	0.0199	ND	0.0339	0.1375	8.1288	0.5461	0.4757	3.1111	1.5326	0.0438	1.7877						
22/10/2018	0.1192	0.0099	0.0660	0.6243	0.0560	0.0319	ND	0.0319	0.1312	7.5252	0.4547	0.5235	4.0428	1.4805	0.0702	1.8366						
03/11/2018	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND						
27/11/2018	0.0112	0.0066	0.0554	0.5114	0.0481	0.0013	ND	0.0323	0.0738	7.7521	0.2036	0.1615	3.6599	1.5150	0.0066	1.0365						
03/12/2018	0.0066	0.0083	0.0655	0.8140	0.0569	0.0013	ND	0.0344	0.0430	8.6660	0.3180	0.2592	4.0996	1.6921	0.0066	1.3714						
20/12/2018	0.1307	0.0106	0.0418	1.2879	0.0464	0.0179	ND	0.0391	0.0816	8.2042	0.5573	3.7886	8.1651	1.4842	0.0391	2.4185						

Nota: ND se refiere a los valores no detectados

Tabla A4.3: Concentración de metales en el material particulado PM10 en la estación de monitoreo Tababela (ug/m3)

Fecha	Concentración PM10											Concentraciones (ug/m3)										
	Cd	Cr	Cu	K	Mn	Ni	Pb	Sr	Zn	Ca	Fe	Al	Na	Mg	V	S						
01/01/2017	0.0046	0.0282	0.0990	0.4387	0.0272	0.0057	0.0891	0.0487	0.0729	11.9828	0.2782	1.6574	4.3314	2.9564	ND	ND						
19/01/2017	0.0007	0.0078	0.0307	0.4439	0.0218	0.0020	0.0663	0.0282	0.1604	4.2916	0.3369	3.5102	3.5102	1.0539	0.0107	1.3615						
18/02/2017	0.0006	0.0028	0.0194	0.3125	0.0237	0.0033	0.0089	0.0272	0.0309	6.8690	0.2890	0.2630	4.7422	1.5775	0.0083	1.5008						
24/02/2017	0.0040	0.0170	0.0634	0.5552	0.0216	0.0046	0.0064	0.0332	0.0672	8.9668	0.1878	1.5780	4.7992	2.2276	ND	ND						
08/03/2017	0.0005	0.0030	0.0151	0.1912	0.0148	0.0010	0.0063	0.0163	0.0200	4.0936	0.0916	0.1253	0.4602	0.9542	0.0074	1.3370						
14/03/2017	0.0042	0.0668	0.0861	0.2912	0.0212	0.0075	0.0357	0.0265	0.1105	6.5118	0.5718	1.7454	4.0859	1.6345	ND	ND						
13/04/2017	0.0037	0.0668	0.0955	0.5151	0.0781	0.0052	0.0086	0.0440	0.0728	11.4279	0.5338	1.9258	3.8434	2.7636	ND	ND						
25/04/2017	0.0006	0.0026	0.0243	0.2339	0.0164	0.0004	0.0192	0.0198	0.0153	6.6450	0.1143	0.1501	3.4144	1.1448	0.0071	1.6311						
19/05/2017	0.0006	0.0074	0.0278	0.3352	0.0288	0.0037	0.0293	0.0325	0.0434	8.6608	0.5073	0.2516	3.3448	1.9691	0.0095	2.1799						
25/05/2017	0.0074	0.0544	0.0716	0.3603	0.0273	0.0033	0.0073	0.0411	0.1821	11.0167	0.2217	1.7137	4.4626	2.6538	ND	ND						
12/06/2017	0.0054	0.0090	0.0591	0.4622	0.0369	0.0075	0.0111	0.0364	0.0645	9.6370	0.6834	2.1017	4.1048	2.3896	ND	ND						
24/06/2017	0.0003	0.0024	0.0316	0.3474	0.0231	0.0010	0.0074	0.0215	0.1566	5.1782	0.2911	0.3670	2.9914	1.2924	0.0103	2.7240						
12/07/2017	0.0058	0.0115	0.0594	0.4681	0.0382	0.0059	0.0109	0.0376	0.0672	9.9004	0.6741	2.1634	4.2076	2.4644	ND	ND						
18/07/2017	0.0003	0.0035	0.0237	0.3204	0.0353	0.0005	0.0026	0.0383	0.0202	8.8217	0.4138	0.4632	5.0326	2.0605	0.0051	1.0644						
17/08/2017	0.0005	0.0036	0.0538	0.3634	0.0372	ND	0.0154	0.0324	0.0403	5.6590	0.5568	0.6535	5.2372	1.8829	0.0073	1.3229						
25/08/2017	0.0007	0.0035	0.0175	0.3663	0.0295	0.0009	0.0284	0.0334	0.0503	8.0109	0.3209	0.3337	5.1889	1.8354	0.0053	1.7318						
22/09/2017	0.0006	0.0043	0.0621	0.5633	0.0450	0.0031	0.0170	0.0423	0.0496	10.2856	0.7795	0.8247	5.9244	2.3367	0.0120	1.6472						
28/09/2017	0.0005	0.0037	0.0219	0.4006	0.0314	0.0007	0.0075	0.0271	0.0277	9.9629	0.4909	0.5749	4.3720	1.3508	0.0085	1.2146						
16/10/2017	0.0004	0.0036	0.1641	0.2785	0.0368	0.0000	0.0018	0.0359	0.0194	7.5528	0.3707	0.3711	5.0232	1.7371	0.0091	0.9366						
22/10/2017	0.0006	0.0035	0.0239	0.3995	0.0276	0.0005	0.0269	0.0299	0.0314	6.7412	0.3525	0.4659	4.3972	1.5326	0.0075	1.6356						
19/01/2018	0.0052	0.0295	0.0703	0.6666	0.0595	0.0153	ND	0.0602	0.0309	7.2506	0.3791	2.7285	4.1463	1.7637	0.0065	2.4824						
25/01/2018	0.0087	0.0063	0.0684	0.8778	0.0687	0.0153	ND	0.0590	0.0372	7.1059	0.7682	3.1458	3.9379	1.8699	0.0108	2.6276						
06/02/2018	0.0055	0.0074	0.0596	0.6231	0.0375	0.0117	ND	0.0568	0.0317	6.7301	0.3530	2.7609	4.1744	1.8685	0.0068	2.4993						
24/02/2018	0.0050	0.0068	0.1164	0.8115	0.0564	0.0161	ND	0.0760	0.1806	9.8345	0.4706	4.1133	6.1939	2.8607	0.0082	2.4555						
14/03/2018	0.0058	0.0018	0.0857	0.7575	0.0426	0.0123	ND	0.0513	0.0387	9.9276	0.6851	2.9256	3.8684	1.6577	0.0124	2.3067						
20/03/2018	0.0876	0.0077	0.0894	0.8523	0.0456	0.0262	0.0203	0.0720	0.0708	7.3841	0.4986	2.9089	4.5601	2.0318	0.0307	4.4237						
13/04/2018	0.0354	0.0084	0.0712	1.1944	0.0714	0.0184	0.0254	0.0781	0.0685	9.5776	0.8356	4.3461	5.9157	2.5683	0.0240	3.1975						
19/04/2018	0.0593	0.0123	0.0665	0.7738	0.0566	0.0159	0.0920	0.0569	0.1149	7.3694	0.9571	3.8246	4.4756	1.9627	0.0191	2.1394						
07/05/2018	ND	ND	0.0547	0.6986	0.0511	0.0139	ND	0.0683	0.0317	8.3446	0.2438	4.0643	5.9983	2.4977	0.0097	2.0419						
31/05/2018	0.2031	0.0040	0.0762	1.1662	0.0826	0.0170	ND	0.0951	0.0567	12.1933	0.4684	5.3754	7.7534	3.4065	0.0181	2.9001						
06/06/2018	0.0277	0.0110	0.0812	1.3700	0.1085	0.0162	0.0006	0.1310	0.0480	15.9947	1.0626	9.3108	4.4548	0.0186	3.5166							
18/06/2018	0.0686	0.0095	0.0675	1.0901	0.1022	0.0112	0.0480	0.1272	0.0205	15.6132	0.8182	7.0876	9.7398	4.5049	0.0102	1.4672						
06/07/2018	ND	0.0111	0.0249	0.5091	0.0229	0.0013	0.0066	0.0197	0.0419	4.0149	0.2870	1.8754	3.6990	0.7333	0.0059	1.0222						
18/07/2018																						
17/08/2018																						
23/08/2018																						
10/09/2018																						
22/09/2018																						
04/10/2018																						
22/10/2018																						
03/11/2018																						
27/11/2018	0.0039	0.0026	0.0371	0.5810	0.0658	ND	0.0124	0.0384	0.0567	9.7752	0.2195	0.2729	4.9817	1.9118	0.0046	1.1529						
03/12/2018	0.0022	0.0065	0.0332	0.6142	0.0563	0.0014	0.0109	0.0360	0.0373	8.1609	0.2719	0.3204	4.3605	1.5966	0.0068	1.3888						
20/12/2018	0.0085	0.0079	0.0308	0.6554	0.0518	0.0013	0.0013	0.0334	0.0256	8.7868	0.6063	0.7688	3.2949	1.3604	0.0066	1.2453						

Nota: ND se refiere a los valores no detectados. En los meses de Agosto a Noviembre del 2018 la Secretaría de Ambiente del DMQ no registró datos de PM10 en la estación de monitoreo Tababela debido a reparaciones en los equipos.

Anexo 5: Tablas de concentración de metales en las hojas de *Araucaria angustifolia* de las zonas de estudio.

Tabla A5.1. Concentración de metales en las hojas de *Araucaria angustifolia* en la estación de monitoreo Belisario (ug de metal/g en base seca)

Fecha	Lugar	Concentración ug metal/g en base seca											
		Ba	Co	Cr	Cu	K	Mn	Pb	Zn	Ca	Fe	Al	Mg
07-08-2019	Belisario	113.5973	0.2135	4.5835	11.8399	2260.0177	239.0080	5.3834	65.3081	30203.9640	892.2026	1905.5694	4310.6635
13-09-2019	Belisario	81.6126	0.5450	3.7372	15.8044	4891.3200	284.9656	2.2968	48.6131	25209.2312	815.1727	633.0980	4151.8173
05-11-2019	Belisario	77.7913	0.2104	2.5595	8.8011	2483.9548	620.6511	1.4722	31.0332	27468.4892	494.5914	449.7520	3535.7322

Tabla A5.2. Concentración de metales en las hojas de *Araucaria angustifolia* en la estación de monitoreo Los Chillos (ug de metal/g en base seca)

Fecha	Lugar	Concentración ug metal/g en base seca											
		Ba	Co	Cr	Cu	K	Mn	Pb	Zn	Ca	Fe	Al	Mg
07-08-2019	Los Chillos	43.6758	ND	0.3956	2.7993	3802.5019	131.4835	1.4315	19.3025	18763.8207	356.0105	1223.2687	4221.9378
13-09-2019	Los Chillos	42.1646	0.2090	0.9422	4.8651	3775.9529	115.4966	1.1497	18.9817	19739.3856	301.6406	393.0349	3845.5831
05-11-2019	Los Chillos	50.2150	ND	0.3022	2.2845	1516.0701	162.4454	1.1431	14.3199	16206.0206	176.7649	310.5908	4210.3680

Nota: ND se refiere a los valores no detectados

Tabla A5.3. Concentración de metales en las hojas de *Araucaria angustifolia* en la estación de monitoreo Tababela (ug de metal/g en base seca)

Fecha	Lugar	Concentración ug metal/g en base seca											
		Ba	Co	Cr	Cu	K	Mn	Pb	Zn	Ca	Fe	Al	Mg
07-08-2019	Tababela	116.2661	ND	0.3871	1.9520	4484.6800	355.2703	0.8588	23.7099	16954.2874	230.4834	1038.3189	2490.8656
13-09-2019	Tababela	107.9221	0.1016	0.4609	3.5303	5711.3953	212.7057	ND	14.1277	17493.1408	111.0115	174.1955	2924.6443
05-11-2019	Tababela	230.8033	ND	1.2772	3.6600	3433.2892	561.1298	ND	17.0390	24785.7977	284.4723	489.9080	2360.9235

Nota: ND se refiere a los valores no detectados

Anexo 6: Tablas con información adicional

Tabla A6.1

Concentración de metales (mg/kg) en el material particulado PM₁₀ y en las hojas de Araucaria angustifolia en la estación de monitoreo Belisario durante los meses de agosto, septiembre y noviembre.

Elemento	Estaciones					
	Belisario		Chillos		Tababela	
	PM ₁₀	<i>Araucaria angustifolia</i>	PM ₁₀	<i>Araucaria angustifolia</i>	PM ₁₀	<i>Araucaria angustifolia</i>
Cr	13.22	1.64	2.55	0.26	4.89	0.31
Cu	27.55	5.46	40.05	1.58	17.04	1.52
K	208.34	1434.32	182.07	1442.15	171.10	2238.08
Mn	13.84	174.89	13.08	65.54	13.05	192.41
Pb	7.83	1.39	7.73	0.59	6.13	0.41
Zn	26.56	21.89	29.15	8.75	17.98	9.03
Ca	2301.08	12570.98	2116.84	8722.71	2453.27	9860.46
Fe	138.71	331.63	130.38	132.54	140.26	104.25
Al	440.18	455.89	462.60	305.15	577.25	278.13
Mg	553.96	1812.39	515.94	1961.10	611.16	1282.26

Tabla A6.2.

Resultados del Anova para cada metal detectados en el material particulado y en las hojas de Araucaria angustifolia entre las estaciones Belisario, Chillos y Tababela para todos los meses de análisis del PM₁₀.

Elemento	Variación entre los años		
	Belisario	Chillos	Tababela
Cr	0.68	0.057	0.28
Cu	0.10	0.14	0.0060 **
K	6.98e-14 ***	2.2e-16 ***	2.2e-16 ***
Mn	5.78e-16 ***	2.2e-16 ***	2.36e-14 ***
Pb	0.20	0.16	0.41
Zn	0.75	0.19	0.27
Ca	2.2e-16 ***	2.2e-16 ***	7.76e-14 ***
Fe	1.98e-07 ***	0.96	0.40
Al	0.96	0.61	0.34
Mg	1.15e-12 ***	1.26e-15 ***	4.81e-05 ***

Códigos de significancia:

*** $0 < p < 0.001$

** $0.001 < p < 0.01$

* $0.01 < p < 0.05$

Anexo 7: Imágenes



Figura A7.1. *Araucaria heterophylla* cercana a la estación de monitoreo Belisario



Figura A7.2. Recolección de muestras de hojas de *Araucaria heterophylla* en Belisario



Figura A7.3. *Araucaria heterophylla* cercana a la estación de monitoreo Los Chillos



Figura A7.4. Recolección de muestras de hojas de *Araucaria heterophylla* en Los Chillos



Figura A7.5. *Araucaria heterophylla* cercana a la estación de monitoreo Tababela



Figura A7.6. Recolección de muestras de hojas de *Araucaria heterophylla* en Tababela



Figura A7.7. *Araucaria heterophylla* considerada como blanco



Figura A7.8. Recolección de muestras de hojas de *Araucaria heterophylla* del blanco

