



FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

COMPARACIÓN DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA EN LA  
PRECIPITACIÓN DE DIFERENTES MAGNITUDES EN UNA CIUDAD DE  
ALTURA: CASO ESTUDIO QUITO.

AUTOR

Diego Alejandro Villarroel Morales

AÑO

2020



FACULTAD DE: INGENIERÍAS Y CIENCIAS APLICADAS

COMPARACIÓN DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA EN LA PRECIPITACIÓN DE  
DIFERENTES MAGNITUDES EN UNA CIUDAD DE ALTURA: CASO ESTUDIO QUITO

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

Profesor Guía

PhD. Rasa Zalakeviciute

Autor

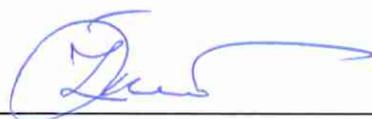
Diego Alejandro Villarroel Morales

Año

2020

## DECLARACIÓN DEL PROFESOR GUÍA

"Declaro haber dirigido el trabajo, Comparación de la composición química en la precipitación de diferentes magnitudes en una ciudad de altura: caso estudio Quito, a través de reuniones periódicas con el estudiante Diego Alejandro Villarroel Morales, 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".



---

Rasa Zalakeviciute

Doctor of Engineering Science

C.I.: 1757076797

## DECLARACIÓN DEL PROFESOR CORRECTOR

"Declaro haber revisado este trabajo, Comparación de la composición química en la precipitación de diferentes magnitudes en una ciudad de altura: Caso estudio Quito, del estudiante Diego Alejandro Villarroel Morales, en el semestre 202010, dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación"



---

Yasser Alejandro González Romero  
Magister en Ingeniería Ambiental  
CC: 0703737627

## 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.”

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Diego', is written above a horizontal line.

Diego Alejandro Villarroel Morales

CC: 1716752959

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a Dios, por permitirme llegar hasta este instante, a mis padres por su apoyo en todo momento. A mis profesores a lo largo de la carrera en especial a Rasa Zalakeviciute por sus conocimientos y guía en este estudio, además de Alejandro González tutor de la carrera y corrector. Finalmente a la Secretaría de Ambiente DMQ, al departamento de investigación UDLA y a todo su equipo de trabajo por acoger este estudio

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo a mis padres Nelson y Gloria, a mis hermanos Nelson y Pablo gracias por su apoyo incondicional y su ejemplo. A mis amigos del colegio y de la carrera por sus enseñanzas. Finalmente a Estefi Mosquera, quien es mi guía y mi inspiración desde el cielo.

## RESUMEN

El incremento global de la población humana ha ocasionado el desarrollo de las industrias, aumento de tráfico y expansión de áreas urbanas, esto a su vez ha traído consecuencias hacia la atmósfera. La lluvia cumple la función de transportar y limpiar todo tipo de contaminante dirigiéndolo hacia la superficie de la tierra. De este modo el presente estudio se enfocó en estudiar la composición química de la precipitación en Quito, Ecuador. Se recolectaron muestras de lluvia de 3 diferentes lugares (Floresta, Sur y Valle de los Chillos), las cuales se analizaron con ICP-OES en laboratorio UDLA-investigación. En las 25 muestras recolectadas entre mayo y noviembre 2019 se encontró 28 tipos de metales provenientes de distintas fuentes. Durante el experimento de un prototipo convencional permitió determinar las distintas categorías de eventos de precipitación. Los resultados de precipitación fueron comparados con las estaciones de la Secretaria de Ambiente de Distrito Metropolitano de Quito (Colón y Belisario) y demostró resultados similares, influenciados por la presencia de microclimas en la ciudad. Los metales más persistentes fueron (Ba, K, Mn, Sr, Ca, Al, Na, Mg y Si) en los 25 eventos de precipitación durante las fechas de muestreo. Cabe recalcar que los elementos analizados fueron influenciados por las condiciones meteorológicas de la ciudad además se determinó que la mayoría de los vientos vienen en dirección sureste es decir desde los Valles y sur de la ciudad. Los metales tóxicos Ni y As, provenientes de fuentes antropogénicas tráfico/industria y Al con Ag de fuente natural superan las recomendaciones de salud. Además se determinó que en la gran mayoría de metales disminuyen su concentración a mayor cantidad de precipitación demostrando el efecto de limpieza de atmósfera. La comparación de concentración de metales con otros sitios de la ciudad indicó mayor concentración de Na, K y Ca en Floresta, Sur y Valle días posteriores al paro de transportistas. Finalmente se encontró una alta concentración de sulfatos en la lluvia, relacionado a componentes de azufre por el consumo de combustibles con altos niveles de azufre en la región.

## ABSTRACT

Global increase in human population has resulted in the increase in industrial, traffic and other anthropogenic activities, in addition to the expansion of urban areas, causing atmospheric pollution. Rain fulfills the function of transporting and cleaning all types of pollutants by directing it towards the earth's surface. Thus, the present thesis aims on studying the chemical composition of precipitation in Quito, Ecuador. Rain samples were collected from 3 different locations (Floresta, Sur and Valle de los Chillos), which were analyzed with ICP-OES in the UDLA-research laboratory. In the 25 samples collected between May and November of 2019, 28 types of metal markers for a number of pollution sources were identified. During the experiment, a conventional pluviometer was used to help categorize precipitation events, ranging from weak to strong. The precipitation results were then compared with the other two meteorological stations in the city, which showed similar results, but slightly influenced by the presence of microclimates in the city. The most common metals were Ba, K, Mn, Sr, Ca, Al, Na, Mg and Si in the 25 precipitation events during the sampling dates. It should be noted that the analyzed elements were influenced by the weather conditions in the city. It was determined that most of the winds come from the southeast, that is, from the valleys and south of the city. The levels of toxic metals Ni and As, from anthropogenic (traffic/industry) sources, and Al and Ag from natural sources exceed health recommendations. In addition, it was determined that the concentrations of the majority of metals decreased due to the increase in accumulation of precipitation. This demonstrates the effect of cleansing by wet deposition. The comparison of the concentration of metals with other sites in the city indicated a greater concentration of Na, K and Ca in Floresta, Sur and Valle during the days after the city protests that took place in the October 2019. Finally, an ion analysis showed a high concentration of sulfates in the rain, due to the consumption of fuels with high levels of sulfur in the region.

## ÍNDICE

|                                     |   |
|-------------------------------------|---|
| 1. CAPITULO I. INTRODUCCIÓN.....    | 1 |
| 1.1 Antecedentes .....              | 1 |
| 1.2 Problemática .....              | 3 |
| 1.3 Objetivos .....                 | 4 |
| 1.3.1 Objetivo General.....         | 4 |
| 1.3.2 Objetivos específicos.....    | 4 |
| 1.4 Alcance .....                   | 4 |
| 1.5 Justificación.....              | 5 |
| 2. CAPITULO II. MARCO TEÓRICO ..... | 6 |
| 2.1 Vapor de agua.....              | 6 |
| 2.2 Niebla.....                     | 6 |
| 2.3 Nube .....                      | 7 |
| 2.3.1 Nube Cumulonimbos.....        | 7 |
| 2.4 Punto rocío .....               | 8 |
| 2.5 Temperatura.....                | 8 |
| 2.6 Presión atmosférica.....        | 8 |
| 2.7 Condensación en altura.....     | 9 |
| 2.8 Precipitación.....              | 9 |
| 2.8.1 Tipos de precipitación.....   | 9 |

|   |           |
|---|-----------|
| 2.8.2 Formas de precipitación .....                         | 10        |
| 2.8.2.1 Lluvia.....   | 11        |
| 2.8.2.2 Llovizna.....                                       | 11        |
| 2.8.2.3 Granizo.....  | 11        |
| 2.9 Medición de precipitación .....                         | 12        |
| 2.9.1 Pluviómetro estándar.....                             | 13        |
| 2.10 Deposición húmeda.....                                 | 13        |
| 2.11 Lluvia ácida .....                                     | 14        |
| 2.11.1 Dióxido de azufre.....                               | 14        |
| 2.11.2 Ácido Sulfúrico.....                                 | 15        |
| 2.11.3 Óxidos de nitrógeno ( <i>NOX</i> ).....              | 15        |
| 2.11.3.1 Ácido Nítrico .....                                | 15        |
| 2.12 Metales pesados .....                                  | 15        |
| 2.12.1 Problemática de metales pesados en la atmósfera..... | 16        |
| 2.13 Aniones .....  | 16        |
| 2.13.1 Ion fosfato.....                                     | 16        |
| 2.13.2 Ion sulfato.....                                     | 16        |
| <b>3. CAPITULO III. METODOLOGÍA.....</b>                    | <b>17</b> |
| 3.1 Área de estudio .....                                   | 17        |
| 3.2. Construcción del pluviómetro .....                     | 18        |
| 3.3 Muestreo de precipitación .....                         | 20        |
| 3.4. Determinación de precipitación por día .....           | 22        |

|  |           |
|--|-----------|
| 3.5 Recolección de datos en diferentes estaciones .....                        | 23        |
| 3.5.1 Estación Belisario .....   | 24        |
| 3.5.2 Estación Udla-Colón.....   | 24        |
| 3.6 Análisis de muestras .....   | 24        |
| 3.6.1 Metales pesados .....  | 24        |
| 3.6.2 Proceso de equipo ICP-OES.....   | 25        |
| 3.6.3 Medición de Aniones .....  | 31        |
| 3.7 Agrupación de datos y regresiones lineales .....                           | 31        |
| 3.8 Utilización Modelo HYSPLIT.....  | 32        |
| 3.9 Comparación de resultados.....   | 32        |
| <b>4 CAPITULO IV. RESULTADOS Y ANÁLISIS .....</b>                              | <b>33</b> |
| 4.1 Información general.....   | 33        |
| 4.2 Resultados de precipitación mayo a noviembre 2019 en tres estaciones ..... | 34        |
| 4.2.1 Correlaciones lineales de precipitación en tres estaciones .....         | 35        |
| 4.2.2 Discusión resultados de precipitación mayo a noviembre 2019 .....        | 37        |
| 4.3 Estación Meteorológica Belisario – Secretaria de Ambiente del DMQ.....     | 39        |
| 4.3.1 Análisis gráficos de estación Belisario.....                             | 41        |
| 4.4 Estación Meteorológica Udla-Colón.....                                     | 42        |
| 4.4.1 Temperatura .....  | 45        |
| 4.4.2 Humedad.....   | 46        |
| 4.4.3 Velocidad del viento .....   | 47        |

|   |    |
|---|----|
| 4.5 Relación entre metales, meteorología y compuestos químicos en dos estaciones .....      | 47 |
| 4.6 Resultados de metales por ICP-OES .....   | 58 |
| 4.7 Clasificación de metales por su fuente. ....  | 62 |
| 4.7.1 Información general.....  | 62 |
| 4.7.2 Metales de fuente de tráfico .....  | 62 |
| 4.7.2.1 Metales de fuente por tráfico con correlación negativa con precipitación .....      | 63 |
| 4.7.2.2 Metales de fuente por tráfico con correlación positiva con la precipitación .....   | 65 |
| 4.7.3 Metales de fuentes industriales .....   | 67 |
| 4.7.3.1 Metales de fuentes industriales con correlación negativa con la precipitación ..... | 68 |
| 4.7.3.2 Metales de fuentes industriales con correlación positiva con la precipitación ..... | 70 |
| 4.7.4 Natural.....  | 72 |
| 4.7.4.1 Metales de fuentes naturales con correlación positiva con la precipitación .....    | 72 |
| 4.7.4.2 Metales de fuentes naturales con correlación negativa con la precipitación .....    | 75 |
| 4.8 Concentración total de metales y comparación .....                                      | 77 |
| 4.9 Metales de fuentes de incendio o quema .....  | 78 |
| 4.10 Análisis ANOVA de eventos de precipitación y composición química .....                 | 80 |

|   |           |
|---|-----------|
| 4.11 Resultados de precipitación Valle de los Chillos y sur de la ciudad de Quito. .... | 81        |
| 4.11.1 Comparación en diferentes sitios de la ciudad (Sur y Valle de los Chillos) ..... | 84        |
| 4.12 Discusión dirección de viento .....  | 84        |
| 4.13 Resultados Aniones Floresta.....   | 86        |
| 4.13.1 Análisis de aniones en Floresta.....   | 87        |
| 4.14 Resultados de aniones sur y Valle.....   | 88        |
| 4.14.1 Análisis de aniones sur y Valle .....  | 89        |
| <b>5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>  | <b>90</b> |
| 5.1 Conclusiones.....   | 90        |
| 5.2 Recomendaciones.....  | 91        |
| <b>REFERENCIAS .....</b>  | <b>92</b> |
| <b>ANEXOS .....</b>   | <b>97</b> |

## 1. CAPITULO I. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Antecedentes

Desde el inicio de la revolución industrial la población incremento a más de 7 400 millones de habitantes hoy en día y se estima que alcance a los 9 700 millones en las próximas décadas. En los últimos años la mayor parte de la población se ha transportado a los lugares de mayor crecimiento urbano e industrial, causando varias alteraciones a nivel ambiental (Zalakeviciute, López-Villada, & Rybarczyk, 2018).

A nivel mundial el 25% de la contaminación de la atmósfera en un ambiente urbano de material particulado 2.5 ( $PM_{2.5}$ ) es contribuido por el tráfico, el 15% por actividades industriales, el 20% por consumo de combustible doméstico, el 22% de fuentes no especificadas de origen humano y el 18% de fuentes naturales polvo y sal, debido a esto una de estas problemáticas es la representación de PM y de los metales pesados en la composición de la agua lluvia (Karagulian et al. 2015).

Las contribuciones por categoría de fuente variaron sustancialmente en diferentes regiones. El tráfico fue el principal contribuyente al ambiente urbano  $PM_{2.5}$  en varias regiones, incluida la India (37%), el sudeste de Asia (36%), el suroeste de Europa (35%), el sur de Asia (34%), Brasil (33%), y el resto de las Américas (30%) (Karagulian et al. 2015).

Conjuntamente de las fuentes principales que ocasionan la contaminación atmosférica, hay algunos imponentes que ocasionan el origen de la conocida lluvia ácida. El amoníaco ( $NH_3$ ) es de las especies alcalinas más importantes presentes en la atmósfera que se encuentra en estado de vapor y es idóneo para neutralizar los ácidos nítrico y sulfúrico, así se incrementa el pH en la precipitación (De Mello y De Almeida 2004).

Entre las principales fuentes de origen antrópico de  $SO_x$  están los combustibles fósiles provenientes del petróleo y carbón (Williams et al. 1997), adicionalmente el transporte vehicular aporta en una compensación importante a las emisiones de  $NO_x$  (Sánchez, L 2009).

Se conoce también que la lluvia participa de manera importante en la limpieza de la atmósfera debido a que en este proceso se remueve la mayor cantidad de aniones presentes. Esta composición puede cambiar de un sitio a otro y depende mucho de la región debido al dominio de las fuentes locales (Argumedo,D 2017).

Las áreas urbanas son los lugares en los cuales el agua lluvia esta mayormente influenciada por las fuentes naturales y antrópicas, como lo son partículas y polvo provenientes de campos de cultivo, inclusive por la emisión de contaminantes relacionados con la quema de combustibles fósiles a través de los vehículos, industrias y servicios varios (García et al. 2006).

La composición química en deposiciones atmosféricas obedece a numerosos componentes químicos y físicos de aerosoles, de acuerdo con esto la química de las deposiciones húmedas se las utiliza como un indicador para valorar los procesos naturales con las influencias antropogénicas (Argumedo,D 2017).

Los componentes que están disueltos en el agua lluvia se los puede organizar en 3 grupos: aerosoles marinos, aerosoles terrestres y las contribuciones antropogénicas que son relacionados con procesos industriales, emisiones de la mala combustión de motores, agricultura entre otras (Argumedo,D 2017).

En el Distrito Metropolitano de Quito (DMQ) se reporta un primer ciclo lluvioso que va desde febrero a mayo y otro durante octubre a diciembre. Las precipitaciones mínimas se observan entre junio y agosto (Zalakeviciute, López-Villada, and

Rybarczyk 2018). En la ciudad de Quito, las masas de aire pueden estar contaminadas por las emisiones de los vehículos a motor, por las fuentes fijas, especialmente las centrales termoeléctricas, fuentes aéreas, como lo son canteras siendo el ocasionante de la contaminación atmosférica que genera la lluvia ácida (Flores and Bonilla 2010).

## **1.2 Problemática**

De los mayores problemas que enfrenta la humanidad es la alteración del medio ambiente debido a la explotación alta de los recursos naturales por las altas demandas industriales y urbanas, además de un sin número de sustancias peligrosas enviadas hacia la atmósfera como a la superficie terrestre, perdiendo así la capacidad regeneradora de la naturaleza y en muchos casos teniendo como resultado un problema de polución ambiental en el cual nos vamos a enfocar más a fondo.

Los metales pesados gracias a sus características altamente tóxicas e inclusive cancerígenas han ocasionado alta preocupación e implícitamente por su alta persistencia en los ecosistemas (Argumedo,D 2017).

La deposición de metales por precipitación puede constituir un importante estrés en los sistemas acuáticos y terrestres, y la medición de su deposición podría ser fundamental para nuestra comprensión del ciclo geoquímico de los metales y sus efectos en los ecosistemas terrestres y acuáticos. Los ciclos biogeoquímicos naturales de muchos metales fueron trastornados por las actividades antropogénicas. Los metales como arsénico (As), cadmio (Cd), cobre (Cu), plomo (Pb) y zinc (Zn), que se transportan en la biosfera principalmente a través de la atmósfera, se eliminan fácilmente mediante la precipitación (Vermette et al. 1995).

Algunos metales como plomo y cadmio, se encuentran a bajos niveles, pueden ocasionar alteraciones a la salud de las personas acorde con las concentraciones a la que se encuentren. Las consecuencias pueden ser comenzando por daños al sistema respiratorio hasta problemas cancerígenos y finalmente la muerte (Argumedo,D 2017).

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 Objetivo General.**

- Determinar mediante análisis químico la composición de la precipitación en los eventos de diferente magnitud obtenidos en muestras en una ciudad de altura como Quito.

#### **1.3.2 Objetivos específicos.**

- Desarrollar un prototipo de recolección de precipitación para obtener muestras en diferentes días.
- Definir la existencia de compuestos químicos presentes en muestras de lluvia medidos diariamente en la zona centro-norte usando métodos de recolección con medidas.
- Identificar las diferencias en la composición química de la precipitación durante dos categorías de eventos.

### **1.4 Alcance**

El presente estudio forma parte de un proyecto de investigación con financiamiento de la UDLA “Chemical composition of PM pollution in high elevation urban area, a case study of Quito, Ecuador (AMB.RZ.19.01)” además de la colaboración de la Secretaria de Ambiente DMQ. Esta tesis tiene como primordial tema la comparación en la composición química presente en las precipitaciones por día en una ciudad de altura en el caso de la ciudad de Quito concretamente en la zona centro-norte, mediante la recolección de muestras con la creación de prototipos de recolección para su posterior análisis en laboratorio con un equipo especializado ICP-OES el

cual nos permitió obtener ciertos valores de varios metales además de la composición química con los aniones.

### **1.5 Justificación**

Con el fin de tomar medidas para reducir la exposición a la alteración del aire y, por lo tanto, los impactos en la salud, es esencial conocer las fuentes y actividades que contribuyen a los niveles locales de contaminación.

Siendo la contaminación atmosférica un problema ambiental que afecta tanto a las personas en su salud como al medio ambiente y los ecosistemas. De las principales causas de contaminación está la acumulación de material particulado en la atmósfera que regresa a la superficie de La Tierra transportados en ciertos casos por el agua lluvia (Karagulian et al. 2015)

El cambio climático en los últimos tiempos se ha incrementado, principalmente por la industria siendo una categoría que incluye principalmente las emisiones de la combustión de petróleo, la quema de carbón en centrales eléctricas y las emisiones de diferentes tipos de industrias (petroquímica, metalúrgica, cerámica, farmacéutica, hardware de TI, etc.). Las fuentes industriales a veces se mezclan con fuentes de combustión no identificados por los contaminantes emitidos a la atmósfera. Estos contaminantes se quedan en el aire y bajan a la superficie por medio de las precipitaciones esto se le conoce como la "lluvia ácida", siendo esto la precipitación en forma de lluvia, nieve, aguanieve, granizo o niebla con altas concentraciones de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ), ácido nítrico ( $HNO_3$ ) y ácido carbónico ( $H_2CO_3$ ) (Granados, López, and Hernández 2010)

Por consiguiente, el propósito de la investigación es determinar los contaminantes presentes en las precipitaciones que se muestran en los días de la época lluviosa en la ciudad de Quito específicamente en la zona centro-norte de la ciudad con el fin de tener en cuenta las fuentes de la que proviene la contaminación y enfocarlo para un futuro estudio sobre las consecuencias.

Por esta razón es un aspecto social positivo el poder conocer la calidad de aire de nuestra ciudad. Existen muy pocos estudios actuales en la ciudad de Quito de concentración de PM y metales pesados en la lluvia. Por ejemplo, uno de los últimos trabajos de investigación fue realizado hace 10 años, donde se estudió la composición de acidez en la lluvia en Quito, entre meses de diciembre de 2008 y enero de 2009 (Flores and Bonilla 2010).

Otro trabajo con precipitación se realizó en el año 2013 se basó en el diseño y edificación de un prototipo de captación de precipitación para el uso en zonas altas con neblina, presentando análisis de algunos metales pesados para análisis químico.

Basado con los estudios previos, este estudio busca determinar resultados actuales y útiles para posteriores proyectos.

## **2. CAPITULO II. MARCO TEORICO**

### **2.1 Vapor de agua**

El vapor de agua en el aire cambia ampliamente, desde cero hasta aproximadamente un 4 por ciento en volumen. No obstante, el vapor de agua tiene otras funciones. Al igual que el  $CO_2$ , puede impregnar el calor emitido por la tierra, y algo de energía solar. Por esto, es muy importante cuando examinamos el calentamiento de la atmósfera (Lutgens and Tarbuck 2013).

En la superficie terrestre se encuentran algunas cantidades de agua en estado de evaporación, la mayoría se ubica entre los cinco primeros kilómetros en el aire, al interior de la tropósfera procedente de distintos orígenes. (Horacio and Sarochar 2011, pp. 9).

### **2.2 Niebla**

Niebla se conoce como un compuesto de gotas pequeñas en estado líquido y sólido formadas debido a la condensación de vapor de agua. La cantidad de agua que contiene las nieblas pueden estar entre  $10^{-4}$  a  $2 \text{ gm}^3$ , y su valor promedio es de 0.2

$gm^3$ . Por eso en las nubes la cantidad de agua que se condensa es más alta que en las nieblas y puede variar entre  $10^{-2}$  a  $4 gm^3$  (Santana Pérez, Manuel, and Abreu 2003).

Se define como una nube con su base en o muy cerca del suelo. Físicamente, no hay diferencias entre la niebla y una nube; sus apariencias y estructuras son las mismas. La diferencia esencial es el método y el lugar de formación, mientras que las nubes se originan cuando el aire sube y se enfría adiabáticamente, la niebla resulta del enfriamiento (Lutgens and Tarbuck 2013).

### **2.3 Nube**

Una nube es un conjunto de gotas de condensación en los que sus diámetros oscilan entre 0.001 a 0.003 mm, separadas por distancias entre 1 mm (Varas 2014).

También se conoce como la acumulación visible de pequeñas partículas que poseen gotas de agua que se suspende en la atmósfera, estas pueden dispersar la luz así se observan de color blanco pero cuando la luz no puede ingresar dan un color gris. (Varas 2014).

#### **2.3.1 Nube Cumulonimbos**

Cumulonimbos es un tipo de nube muy densa con una forma similar a una montaña o torres, parte su parte superior es lisa y aplanada como se observa en la Figura 1. Estas nubes ocasionan las tormentas, tornados, granizos. Pueden estar entre 700 y 1500 m y la parte superior entre 10 a 12 km de alto.

Para su formación es necesario de tres componentes: gran cantidad de humedad en ambiente, masa inestable de aire caliente y alguna fuente de energía que pueda elevar la masa caliente y húmeda (Horacio and Sarochar 2011).



*Figura 1:* Nube Cumulonimbos.

Tomado de (Horacio and Sarochar 2011).

## **2.4 Punto rocío**

La conocida temperatura en el punto de rocío es la cual el vapor de agua que está entre una combinación de gases se condensa (Martines and Gómez 2008).

Cuando la masa de aire es enfriada alcanza una temperatura que se conoce como punto de rocío llegando a condensarse, así se convierte en líquido, es decir en gotas de lluvia y si la temperatura es muy baja en cristales de hielo (Horacio and Sarochar 2011).

## **2.5 Temperatura**

La temperatura se considera una magnitud que corresponde al valor de energía cinética que llegan a conformar un cuerpo. Al hablar de la temperatura en meteorología nos referimos a temperatura en el aire en un lugar y momento determinado. En la troposfera el aire es calentado por la radiación que expresa la superficie terrestre por lo que la temperatura baja conforme aumenta la altitud (Wallace and Hobbs 2006, pp.232-233).

## **2.6 Presión atmosférica**

Presión atmosférica se define como la presión del aire a cualquier altura en la atmósfera se da gracias a la fuerza en una unidad de área influenciada por el peso de todo el aire que se encuentra por encima de esa altura. En consecuencia, esta

presión disminuye al aumentar la altura sobre el suelo (Wallace and Hobbs 2006, pp. 67).

## **2.7 Condensación en altura**

Las nubes se originan cuando normalmente el conocido vapor de agua se condensa debido al enfriamiento adiabático. A una altura conocida como nivel de condensación de elevación, la parcela ascendente se ha enfriado y desencadena la condensación. Para que ocasione condensación, se deben cumplir dos condiciones: el aire debe estar saturado y debe haber una superficie sobre la cual se pueda condensar el vapor de agua. Sin embargo, cuando se produce condensación en el aire, las pequeñas partículas conocidas como núcleos de condensación de nubes sirven para esta finalidad. (Lutgens and Tarbuck 2013).

## **2.8 Precipitación**

Precipitación es el evento en el cual se produce por la caída de gotas de agua o cristales de hielo, posteriormente durante un largo recorrido pudiendo presentar cristales de hielo, a su vez las gotas se precipitan gracias a su peso entre una velocidad de 4 u 8 m/s según sea la influencia del viento. En cuanto a su dimensión varía entre 0.7 a 5 mm de diámetro (Horacio and Sarochar 2011).

Se conoce también a la precipitación por la caída de agua en cualquier estado empezando por la atmósfera hasta llegar a la superficie. Es en esta zona del aire donde se llega a enfriar por diferentes procesos generando que disminuya la saturación del aire, como resultado de esto son las nubes (Ahrens, 2009).

### **2.8.1 Tipos de precipitación**

Hay diferentes tipos de precipitación: convectiva, ciclónica y orográfica (Figura 2). Precipitación convectiva presenta inestabilidad en una masa de aire caliente, esta masa de aire caliente asciende luego se enfría, se condensa y forma una nubosidad de tipo cumulonimbos. La precipitación ciclónica en cambio se presenta en dos casos la frontal la cual puede suceder en cualquier depresión, dando como resultado el ascenso por la convergencia de más de aire. Existe otro tipo de

precipitación conocida como orográfica la cual tiene un origen en el ascenso por topografía de una masa de aire (Flores, J 2005)

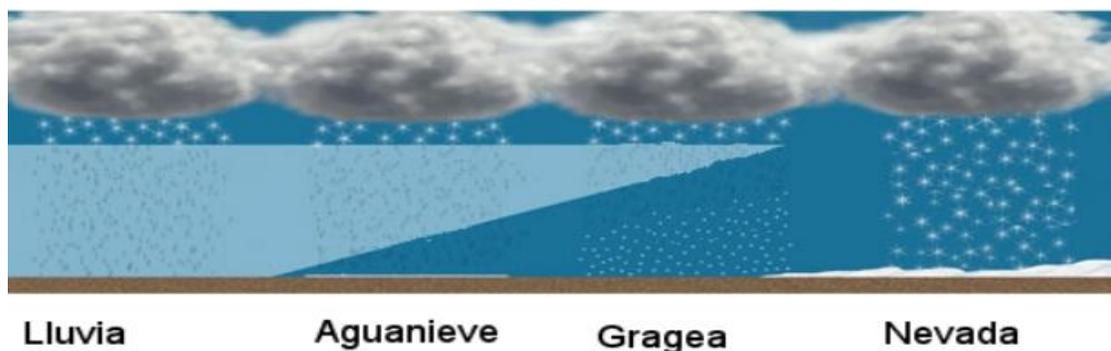


Figura 2. Convección, Orográfica y Ciclónica.

Tomado de (Horacio and Sarochar 2011).

### 2.8.2 Formas de precipitación

Existen varias formas de precipitación, las más comunes son lluvia y nieve, aunque hay otras que es necesario mencionar. Aguanieve, lluvia helada (glaseado) y granizo a menudo producen clima peligroso como se presenta en la Figura 3. Aunque su presencia es limitada y esporádica tanto en tiempo como en espacio, estas formas, especialmente la lluvia helada y el granizo, a veces pueden causar daños considerables, es por eso que varían constantemente las condiciones atmosféricas tanto geográficamente y estacionalmente, lo que resulta en varios tipos diferentes de precipitación (Lutgens and Tarbuck 2013).



*Figura 3. Formas de precipitación.*

Tomado de (Lutgens and Tarbuck 2013).

### **2.8.2.1 Lluvia**

En meteorología, el término lluvia se limita a gotas de agua que caen de una nube y tienen un diámetro de al menos 0.5 milímetros. La mayoría de la lluvia se produce en nubes de cumulonimbos las cuales son capaces de crear precipitaciones inusualmente intensas (Lutgens and Tarbuck 2013).

Algunas veces la precipitación empieza siendo hielo, pero se derrite al llegar a la superficie de la tierra, inclusive algunas de las gotas de diámetro 0.5 mm pueden llegar a tener una velocidad superior al caer de 3 m/s. por esto se puede agrupar entre mayor o menor intensidad y se las conoce como lluvia fuerte, y ligera (Horacio and Sarochar 2011).

### **2.8.2.2 Llovizna**

Las gotitas finas y uniformes de agua que tienen un diámetro inferior a 0,5 milímetros se denominan llovizna. La llovizna y las pequeñas gotas de lluvia generalmente se producen en estratos o nubes nimboestratos, donde la precipitación puede ser continua durante varias horas o durante días en raras ocasiones. A medida que la lluvia ingresa al aire insaturado debajo de la nube, comienza a evaporarse (Lutgens and Tarbuck 2013).

La llovizna además puede ser de gran duración, con poca intensidad de alrededor de 1 mm por hora (Horacio and Sarochar 2011).

### **2.8.2.3 Granizo**

El granizo es un fenómeno atmosférico que es el resultado de la precipitación en estado sólido (Olcina Cantos, Rico Amorós, and Jiménez Rodríguez 1998).

También se conoce que el granizo es un tipo de precipitación en pedazos de hielo. Los grandes granizos tienen un núcleo interior de hielo de aspecto vidrioso, como

se aprecia en la Figura 4. El granizo se conforma de las nubes, con vientos que hacen que se engruesen cristales para posteriormente por la gravedad caer al suelo (Garcia de Pedraza 2010).

Existen diferentes tipos de granizo entre los cuales se presentan el blando, duro, piedra y garrotillo. Los principales son el granizo duro el cual está recubierto por una capa de hielo y tiene un aspecto vidrioso, semitransparente y resistente y se forma principalmente de las nubes de desarrollo vertical especialmente fuerte llamadas Cumulonimbos. Además el granizo tipo piedra que tiene un tamaño de alrededor dos centímetros de diámetro, estos se producen en nubes cumulonimbos los cuales se desarrollan especialmente e días de calor y humedad (Horacio and Sarochar 2011).



*Figura 4.* Muestra de granizo.

Tomado de (Garcia de Pedraza 2010).

## **2.9 Medición de precipitación**

La forma más común de precipitación es la lluvia, probablemente la más fácil de medir. Cualquier recipiente abierto que tenga una sección transversal consistente puede ser un tipo de pluviómetro. Sin embargo, en la práctica general, se utilizan dispositivos más sofisticados para medir pequeñas cantidades de lluvia con mayor precisión y para reducir la pérdida por evaporación (Lutgens and Tarbuck 2013).

Un pluviómetro es aquel instrumento utilizado en la investigación meteorológica para la medición y recolección de agua lluvia. Su unidad de medida es milímetros equivalente a una lámina de  $1 m^2$  de superficie y a un milímetro de espesor (Horacio and Sarochar 2011).

### 2.9.1 Pluviómetro estándar

El pluviómetro estándar tiene un diámetro de aproximadamente 20 centímetros (8 pulgadas) en la parte superior. Una vez que el agua es recogida, un embudo conduce la lluvia a través de una abertura estrecha hacia un tubo de medición cilíndrico que tiene un área de sección transversal de solo una décima parte del receptor como en la Figura 5. Cuando la cantidad de lluvia es inferior a 0.025 centímetros, generalmente se informa como un rastro de precipitación. Además del pluviómetro estándar, se utilizan habitualmente algunos tipos de medidores de registro. Estos instrumentos no solo reconocen la cantidad de lluvia sino también su tiempo de ocurrencia e intensidad (cantidad por unidad de tiempo) (Lutgens and Tarbuck 2013).

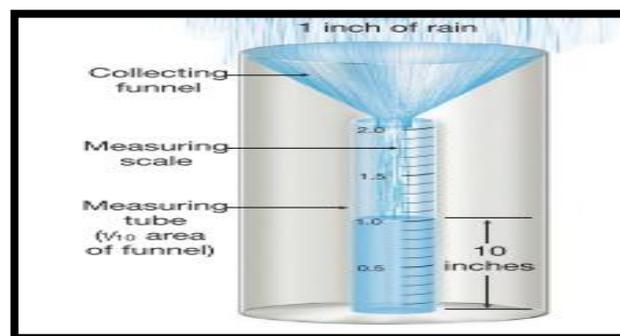


Figura 5. Pluviómetro estándar.

Tomado de (Lutgens and Tarbuck 2013).

### 2.10 Deposición húmeda

Durante su transporte alrededor de la atmósfera el  $SO_2$  y el  $NO_2$ , son parte de reacciones que incluyen al oxígeno y vapor de agua, luego estas se diluyen para bajar a la tierra como lluvia ácida, niebla y nieve (Granados et al. 2010).

El otro proceso importante de eliminación de gases y aerosoles es la deposición en la superficie y vegetación de la Tierra. La deposición es de dos tipos: húmeda y seca. La deposición húmeda, que implica la eliminación de gases y partículas en el aire por las nubes y la precipitación, es uno de los primordiales mecanismos por los que se limpia la atmósfera (Wallace and Hobbs 2006).

## **2.11 Lluvia ácida**

La lluvia o nieve ácida se forma cuando los contaminantes se unen al agua, con una aceleración del proceso debido a la luz del sol logrando que los óxidos de azufre se convierten en ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ), los óxidos de nitrógeno en ácido nítrico ( $HNO_3$ ) y el dióxido de carbono en ácido carbónico ( $H_2CO_3$ ).

El agua de lluvia que no está contaminada es decir en estado puro posee un pH de 5,6 pero en condiciones sometidas a contaminación industrial el pH tiene un valor cercano a 5 (Granados et al. 2010).

Las fuentes antropogénicas corresponden a fuentes fijas como lo son las plantas que trabajan con combustibles y fuentes móviles como el parque automotriz, cuando los óxidos de (S y N) ingresan en la atmósfera pueden ser desplazados por el viento miles de kilómetros, mientras más tiempo permanezcan estas sustancias en ella es más probable que sean ácidas. El agua lluvia es ácida con un pH entre 5 y 7. En lugares más contaminados por los ácidos el pH varía entre 5 y 3 (Fernando et al. 2004).

### **2.11.1 Dióxido de azufre**

Se conoce que el dióxido de azufre  $SO_2$  es un tipo de gas con olor fuerte y pueden ser en las siguientes formas:  $SO_2$ ,  $SO_3$ ,  $H_2S$ ,  $SO_4$  en la cual el  $SO_2$  es de las emisiones más comunes de los que contienen azufre. La mayoría de emisiones de este compuesto se deben a centrales térmicas de carbón o combustible líquido.

### **2.11.2 Ácido Sulfúrico**

El ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) a temperatura ambiente está en estado líquido siendo corrosivo, incoloro, inodoro y de gran viscosidad. Es un oxidante que cuando se mezcla con agua produce o liberará calor. La exposición se da por varias razones principalmente por las industrias químicas en las cuales normalmente se queman carbón, aceite y gasolina emitidos al ambiente.

Además de los efectos que tiene en contra de la salud humana también ocasiona efectos en el medioambiente ya que si se transforma a sulfato sódico puede llegar a ser tóxico en agua (Ramírez and Viteri 2014).

### **2.11.3 Óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ )**

Los óxidos de nitrógeno están relacionados con compuestos químicos altamente reactivos los cuales son generados por: en la mayor parte por producción eléctrica y transporte produciendo ácidos como el ácido nítrico ( $HNO_3$ ) (Rodríguez, Armando; Sánchez 2005).

#### **2.11.3.1 Ácido Nítrico**

Ácido nítrico es altamente corrosivo y fuerte, es también incoloro aunque a veces puede ser de color rojo e inclusive es muy soluble, además puede descomponer por el calentamiento formando agua, oxígeno y  $NO_2$ .(UAE 2012).

## **2.12 Metales pesados**

Metales pesados son sustancias tóxicas con el ambiente y muy peligrosos. Se los reconoce por estar relacionados por: bioacumulación, persistencia, biotransformación y elevada toxicidad lo que hace que se permanezcan en el medio ambiente por largo tiempo por su dificultosa degradación natural.

Se conoce a los metales pesados como elementos de elevado peso atómico, altamente tóxicos que se emplean en procesos industriales, como los son principalmente cadmio, plomo, mercurio, cobre y níquel que en concentraciones

bajas pueden llegar a ser nocivos para plantas y animales (Rodríguez-Heredia 2017).

Algunos metales forman parte de la naturaleza, pero algunos pueden ser tóxicos para las personas y como para el medio ambiente de acuerdo a la cantidad de exposición: dosis absorbida, naturaleza química del metal entre otras cosas. Hay también otros métodos que origina el ser humano como lo son las industrias, agricultura, minerías y ganaderías de esta manera se encuentran en: aire, suelo, agua y flora y fauna, inclusive en el organismo de los humanos (Huguet et al. 2007).

### **2.12.1 Problemática de metales pesados en la atmósfera.**

La exposición de metales pesados a la atmósfera a través de sustancias como polvos o aerosoles en su mayoría provienen de origen antropogénico y por su puesto la humanidad está expuesta a todos estos contaminantes por una simple inhalación en el aire (Huguet et al. 2007).

## **2.13 Aniones**

Aniones son iones de carga eléctrica negativa. Entre iones atmosféricos más comunes existen: Sulfatos, nitratos, fosfatos y amonio.

### **2.13.1 Ion fosfato**

El ion fosfato  $PO_4$  está formado por el fósforo inorgánico el cual se presenta como un tipo de mineral ayudando a este en su ciclo en la naturaleza. El agua lluvia puede contener gran cantidad de fosfatos además sirve como nutriente para el crecimiento de algunas algas (Bolaños-Alfaro, Cordero-Castro, and Segura-Araya 2017).

### **2.13.2 Ion sulfato**

El ion sulfato es abundante en la naturaleza, el promedio de sulfato en lluvia está en 6 mg/L ocasionadas por actividad humana (Bolaños-Alfaro et al. 2017).

### **3. CAPITULO III. METODOLOGÍA**

#### **3.1 Área de estudio**

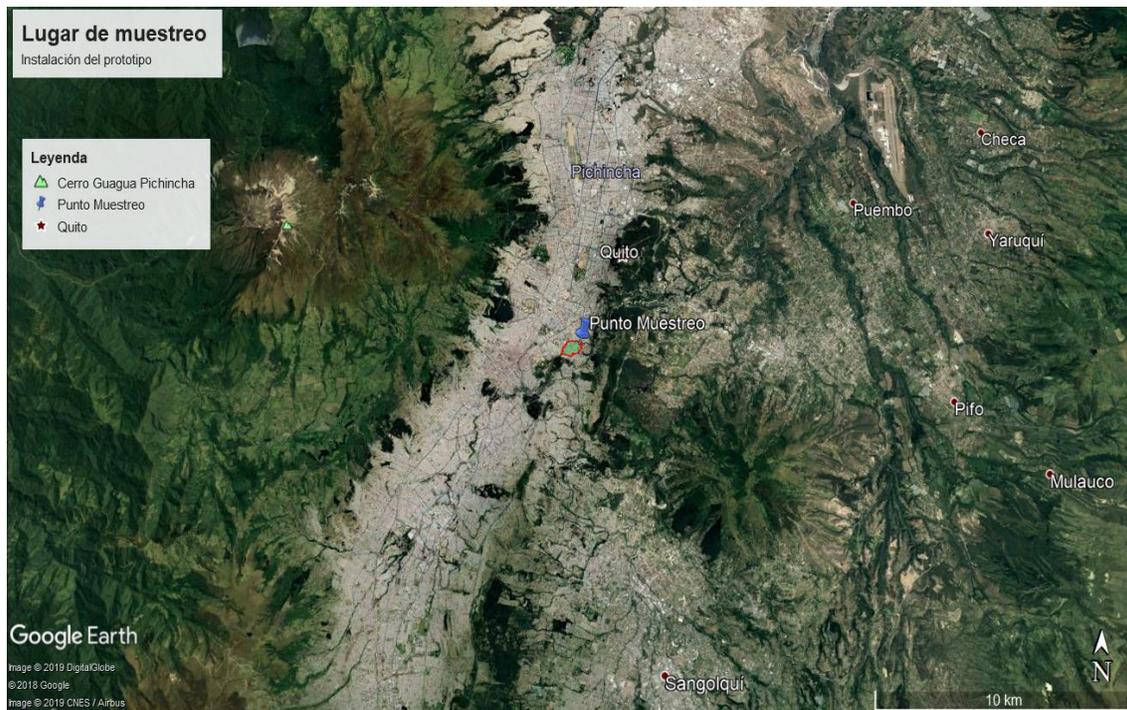
La ciudad de Quito, capital del Ecuador cuya altura se encuentra entre 2700 y 3000 metros sobre el nivel del mar (msnm) y entre sus Valles aledaños a 2300-2450 msnm posee 2239191 habitantes extendidos a lo largo de su compleja e irregular topografía que ocasiona problemas en su expansión (INEC, 2011).

La alta intensidad solar en la zona ecuatorial contribuye a la formación de smog fotoquímico y a los problemas de contaminación del aire a largo plazo (Zalakeviciute et al., 2017). Quito, ubicada en una región tropical de gran altitud, se caracteriza por pequeñas variaciones de temperatura durante la época seca (junio-agosto, con una precipitación promedio de alrededor de 14 mm / mes) y lluviosa (septiembre-mayo, con una precipitación promedio de 59 mm / mes) (EMASEO, 2011).

En la ciudad de Quito el clima es estimado como subtropical de tierras altas, inclusive abarcando climas como templados y áridos e inclusive fríos y húmedos. La zona urbana de Quito esta agrupada en cuatro principales zonas: sur, centro, norte y Valles, de todas estas zonas la más fría es la del sur debido a su mayor nivel de altitud las demás se conservan en templadas (Flores and Bonilla 2010)

El plan experimental se desarrolló en una zona urbana del DMQ específicamente en un área residencial en el barrio La Floresta ubicada al noreste de la ciudad, cercano del cerro Itchimbía y del río Machángara a una altitud de 2750 msnm como en Figura 6. Con cercanías a zonas comerciales como lo son los barrios de La Floresta y La Mariscal donde existe un mayor asentamiento humano y flujo vehicular siendo influenciado por ciertas características topográficas que varían en altitud y tipo de suelo.

Los meses de estudio serán los meses de invierno entre abril y mayo, además de una extensión en los meses invernales que van desde octubre a noviembre del presente año.



*Figura 6.* Lugar de muestreo con respecto a la ciudad de Quito vista desde Google Earth.

### 3.2. Construcción del pluviómetro

La construcción de cuatro prototipos conocidos como pluviómetros convencionales fueron realizados para la recolección de muestras en los meses de estudio, entre sus ventajas están la obtención de datos isotópicos en un compuesto químico con alta resolución temporal

El primer prototipo tuvo una fase de prueba para la verificación de eficiencia en relación al valor de los datos de precipitación como en Figura 7. Con este criterio se comprobó que era exitoso para usarlo a lo largo del proyecto entre las primeras semanas del mes de mayo del 2019 además de ser verificado con los datos de Secretaria de Ambiente.

El pluviómetro se debe colocar verticalmente a nivel del suelo, protegido de que los vientos no puedan removerlo y que su altura sea uniforme (OMM, 1983)

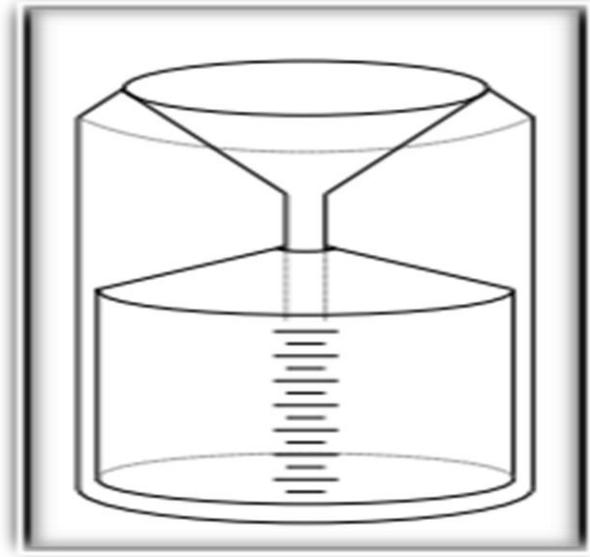


Figura 7. Pluviómetro convencional en 2D

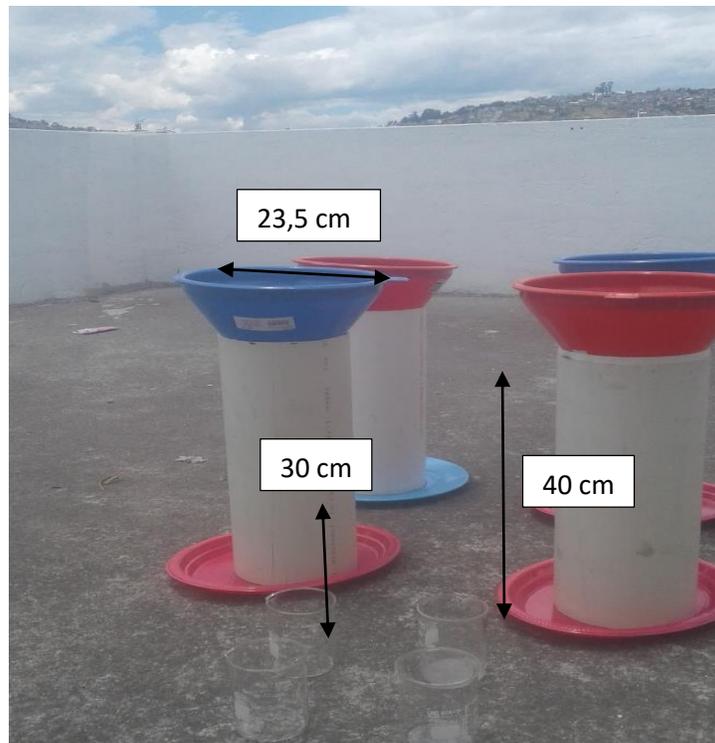


Figura 8. Prototipos de recolección.

El diseño cuenta con un embudo de 23.5 cm de diámetro, un vaso de precipitación de 250 ml, un recubrimiento de protección de pvc de 40 cm de alto y soportes de

30 cm de alto necesarios para la protección del viento, manteniendo el colector fijamente sostenido en el sitio de muestreo. El equipo de recolección debe estar instalado en un terreno al aire libre, preferiblemente en una terraza. Con valores de pendiente de alrededor de  $\pm 15\%$  (OIEA/GNIP 2014).

Tabla 1.

*Diámetro del embudo en relación a mm de lluvia.*

| <b>Diámetro del embudo ( área del orificio) <math>cm^2</math></b> |                     |                    |                   |                   |                     |
|---|---------------------|--------------------|-------------------|-------------------|---------------------|
| <b>Cantidad (mm)</b>  | <b>12.7 (127) A</b> | <b>15.9 (200)B</b> | <b>20.3(324)C</b> | <b>25.2 (500)</b> | <b>30.4 (730) D</b> |
| 0.1   | 1.3                 | 2                  | 3.2               | 5                 | 7.3                 |
| 0.5   | 6.4                 | 10                 | 16.2              | 25                | 36.5                |
| 1   | 12.7                | 20                 | 32.4              | 50                | 73                  |
| 5   | 635                 | 100                | 162.1             | 250               | 364.8               |
| 10  | 127                 | 200                | 324.3             | 500               | 729.7               |
| 50  | 635                 | 1000               | 1621.5            | 2500              | 3648.3              |
| 100   | 1270                | 2000               | 3242.9            | 5000              | 7296.6              |
| 500   | 6350                | 10000              | 16214.6           | 25000             | 36482.9             |

### **3.3 Muestreo de precipitación**

Las mediciones se realizaron cada 24 horas (1 día) medidos en mm/día en una zona residencial en un periodo de tiempo de 6 meses.

Para recolectar las muestras se utilizaron botellas de plástico comunes de agua consumible no de refrescos ni otro tipo de líquido envasado. El tamaño del recipiente puede tener un volumen entre 600 ml a 1 litro como en la Figura 9.

Las botellas deben estar completamente limpias, sin restos de algún fluido o sustancia extraña a la muestra que pueda influir en los resultados (material particulado o polvo)

Las muestras deben ser completamente selladas, etiquetadas y conservadas en refrigeración hasta su transporte y posterior análisis en laboratorio (OIEA/GNIP 2014)



*Figura 9.* Botellas con muestra de precipitación

Durante todos los días de la recolección es necesario que el agua lluvia sea almacenada cada día después de un evento para prevenir la evaporación (OIEA/GNIP 2014) también el pluviómetro debe ser secado y limpiado antes de dejarlo en posición vertical, además se debe limpiar y lavar el embudo y el vaso de precipitación con agua destilada y alcohol de limpieza posteriormente otro enjuague con agua destilada, todo esto para evitar que se acumule polvo o algún tipo de sustancia que altere los análisis.

Se calcula la cantidad de lluvia según la siguiente ecuación:

$$\text{Cantidad de precipitación [mm]} = 10V / (A = \pi r^2)$$

Donde:

**V:** Volumen de precipitación recogido

**A:** Área de embudo del pluviómetro



*Figura 10.* Vaso de precipitación con medida de muestra.

### **3.4. Determinación de precipitación por día**

Una vez terminada las 24 horas del día se mide la cantidad de precipitación en volumen que se obtuvo en un vaso de precipitación milimetrado. Con este dato, adicionalmente el área del embudo se hace una relación en mm/día transformando unidades de volumen en ml a mm obteniendo la relación en mm/día los cuales después de anotar la cantidad de precipitación, se colocó directamente a la botella de plástico.

Los parámetros meteorológicos u otros parámetros según el procedimiento seleccionado también fueron registrados con el fin de tener en cuenta las condiciones en las que se trabajó. Además los datos obtenidos fueron anotados en tablas de registro de Excel para posteriormente compararlos.

Para la determinación en milímetros de precipitación por día se utiliza la siguiente ecuación la cual consiste en hallar el área de ingreso de lluvia. En este caso determinado el diámetro del embudo en cm cuadrados y dividiéndolo para el volumen que se obtiene en principio en (ml) pero se lo transforma a cm cúbicos.

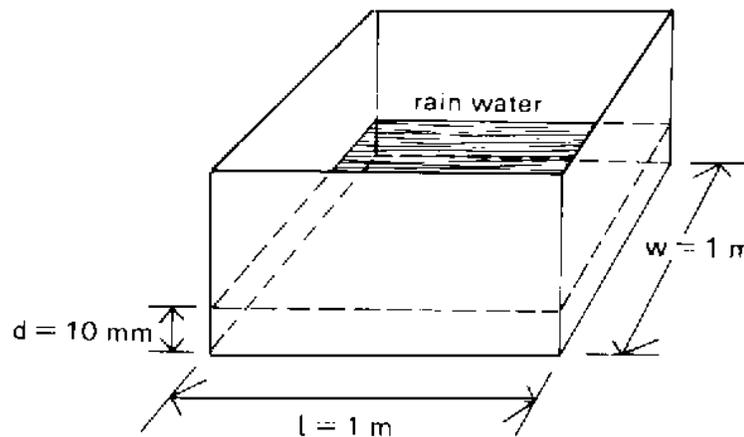


Figura 11. Ejemplo de 10 mm de agua de lluvia recogida en un contenedor. Adaptado de (OIEA/GNIP 2014).

$$A = \pi * r^2$$

$$A = \pi * (11,75)^2$$

$$A = 433,73 \text{ cm}^2$$

$$A = 43373,6 \text{ mm}^2$$

$$V = ml \Rightarrow mm$$

$$mm/día = \frac{mm^3}{mm^2}$$

### 3.5 Recolección de datos en diferentes estaciones

Una de las estaciones de la red de monitoreo REMMAQ del DMQ, manejadas por la Secretaria de Ambiente, contiene datos más completos de contaminación del aire y parámetros meteorológicos y está ubicada en la zona Belisario (elevación: 2835 msnm, coord. 78°29'24" W, 139 0°10'48" S). Además, recogimos datos desde el 26 de mayo del 2019, desde otra estación meteorológica de la Universidad de Las Américas desde Campus Udla-Colón (coord. 78°29'5.59"W, 0°12'9.06"S). Estos dos sitios son los más cercanos para validar nuestros datos entre si teniendo un entorno altamente urbanizado.

### **3.5.1 Estación Belisario**

La secretaria de ambiente del DMQ tiene seis estaciones meteorológicas que son utilizadas para medir la velocidad y dirección del viento, humedad, radiación solar, temperatura, presión y precipitación. Todos estos sensores están localizados en la parte alta de las estaciones.

La estación Belisario está ubicada en la terraza de un edificio, y fue seleccionada entre las 6 estaciones por su cercanía a la zona de la Floresta que contuvo los prototipos diseñados para recoger las muestras de precipitación y además por su similar entorno urbano al que se asemeja la estación meteorológica UDLA-Colón.

### **3.5.2 Estación UdlA-Colón**

La estación meteorológica UDLA-Colón está ubicada en la sede del mismo nombre de la Universidad de las Américas en la Av. Colon y Av. 6 de Diciembre, es de mucha utilidad por su cercanía al lugar en el cual los prototipos diseñados almacenaron las muestras de precipitación (Floresta), pero además por su entorno urbano similar al de Belisario.

Esta estación meteorológica fue inaugurada el pasado 23 de mayo de 2019 siendo entregado por el Instituto de Investigación Geológico y Energético (IIGE) a la UDLA para proyectos de investigación del grupo BIOMAS. En esta estación se podrá recolectar datos de algunas variables como: temperatura ambiente, humedad relativa, radiación solar, presión atmosférica, precipitación, velocidad y dirección del viento a más alta resolución de cada 10 minutos.

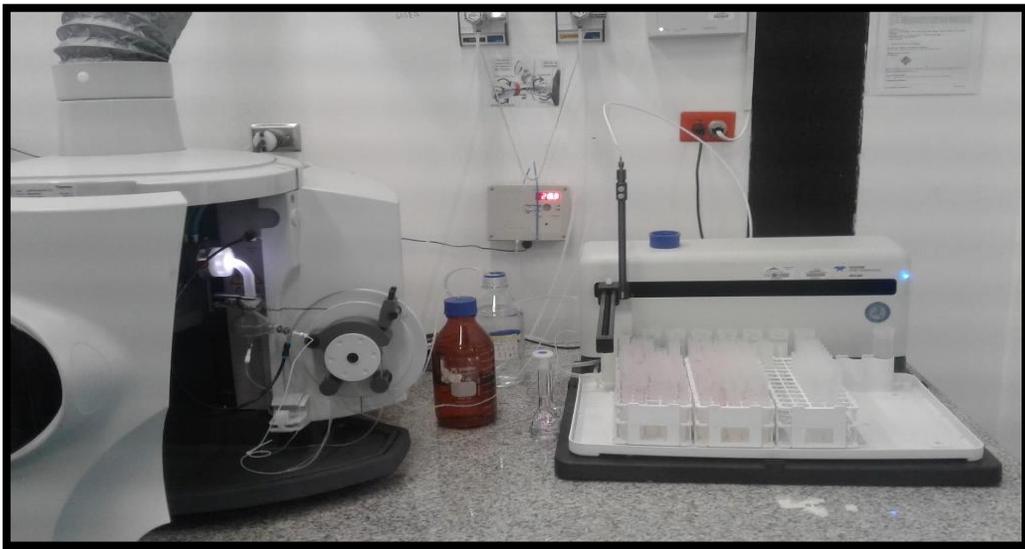
## **3.6 Análisis de muestras**

### **3.6.1 Metales pesados**

Una vez finalizado los eventos de precipitación y el tiempo de medición, las muestras selladas y etiquetadas por fechas fueron transportadas y enviadas al Laboratorio de Investigación de la Universidad de las Américas, para el análisis por plasma de acoplamiento inductivo (ICP-OES, por sus siglas en inglés) y espectrofotómetro de emisión óptico (Figura 12). ICP es una técnica que puede

determinar concentraciones de trazas a elementos principales y puede detectar la mayor parte de los elementos de la tabla periódica. Se pueden obtener resultados confiables para aproximadamente 30 elementos con un rango de confiabilidad de partes por billón para identificar la presencia y concentración de metales pesados comparados con un blanco.

El análisis de metales en ICP-OES se puede realizar en muestras sólidas y líquidas, pero una muestra sólida se debe convertir en forma líquida antes de analizarla disolviendo la muestra en un disolvente (típicamente ácido) para producir una solución. La solución de muestra se introduce en el ICP como un aerosol fino de gotitas. El aerosol es producido por un nebulizador que aspira la muestra con argón a alta velocidad para formar una niebla fina.



*Figura 12.* Equipo ICP - OES (Espectrofotómetro de emisión atómica).

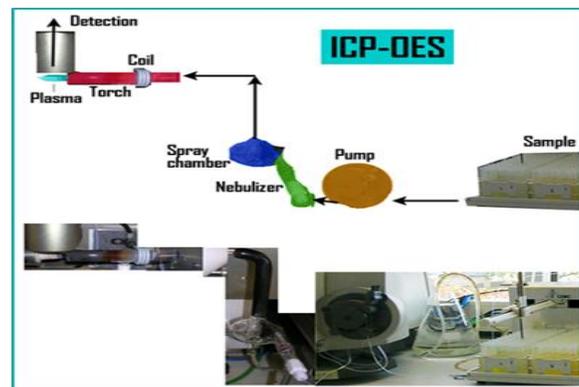
### **3.6.2 Proceso de equipo ICP-OES**

Una vez con las muestras, los elementos químicos se analizaron mediante un tipo de plasma que se acopla de manera inductiva (ICP-OES), serie Thermo Scientific

iCAP 7000) (Zalakeviciute et al. 2019). Las muestras deben entregarse en tubos de 12 a 15 ml. Se debe digerir con normas de EPA digestión de agua, se empieza agregando 45 ml de muestras y 5 ml de ácido nítrico se coloca tiempo de rampa 10 minutos, mientras aumenta la temperatura y tiempo de espera 10 minutos más con 20 minutos más de espera hasta que se enfrié las muestras lo que nos da un total de 30 minutos. A continuación a partir de la materia orgánica se libere los metales pesados puesto que el material sólido debe ser destruido, preferiblemente solo con ácido nítrico (concentración de  $HNO_3$  por debajo del 10%, idealmente del 1%), o si es necesario con  $HNO_3 / H_2$ . Este paso se realiza en el microondas el cual tiene carrusel adentro donde se encuentran tubos de teflón. Se trabaja con ácido nítrico el cual debe ser resistente. Posteriormente se trabaja a 200 grados centígrados de nivelación.

Una vez filtrados se procede al equipo ICP que tiene 4 gradillas el cual puede recibir hasta 480 muestras. Para ello es necesario tener una curva de calibración, la cual funciona con argón y nitrógeno en los manómetros.

Nitrógeno lleva el argón y el argón prende el plasma para llegar a 4000 grados centígrados. Además, posee un horno de cerámica para trabajar en altas temperaturas, incluye un automuestreador, el cual dirige las muestras por las mangueras hasta la bomba peristáltica le lleva a la cámara de nebulización. Esta cámara debe estar muy bien lavada con ácido nítrico y jabón especial.



*Figura 13. Partes de funcionamiento ICP-OES.*

Adaptado de (Willoughby, Lindberg, & Weiss, 1995).

Finalmente se debe alinear la antorcha para que esté calibrada. Esta se alinea con 2 ppm de zinc visualizando en la pantalla del computador el estado del equipo. Los estados de alineación de antorcha y secuencia de muestras, cabe recalcar que la medición del mercurio se realiza aparte de los 33 metales.

ICP-OES es un equipo ideal para analizar soluciones de baja concentración en muestras de precipitación. Se proporcionaron partes alícuotas de las muestras de precipitación al laboratorio analítico (Granados et al. 2010)

La espectrometría de emisión óptica de ICP últimamente es calificada como una técnica de análisis multipropósito y hay más de 2,000 unidades de ICP-OES en uso en el mundo. Es considerado como una técnica de medición ambiental, y se espera que su uso se expanda aún más en el futuro (Lamprea and Ruban 2011)

Los elementos analizados mediante la calibración externa para medir las concentraciones de los siguientes elementos: Aluminio, Arsénico, Azufre, Boro, Bario, Bismuto, Calcio, Cromo, Cadmio, Cobre, Estroncio, Fósforo, Galio, Hierro, Litio, Manganeso, Magnesio, Níquel, Plata, Plomo, Potasio, Selenio, Silicio, Sodio, Teluro, Titanio, Vanadio y Zinc durante un escaneo de prueba ICP como se muestra en la Tabla 2:

Tabla 2.

*Lista de características de los metales analizados por ICP.*

*Tomado de Libro VI Anexo 1 Norma de Calidad Ambiental: Recurso Agua*

| <b>Metal</b>     | <b>Origen</b>   | <b>Estándar de salud Rango Optimo</b> | <b>Efectos en la salud</b>  |
|------------------|---|---------------------------------------|---|
| <b>Boro</b>      | Se encuentra de manera natural en el medioambiente por los procesos de erosión. | < 0,75 mg/L                           | En pequeñas cantidades irritación en nariz, ojos y garganta .Puede llegar a ocasionar infecciones en estómago, hígado, riñones y eventualmente la muerte. |
| <b>Bario</b>     | Su fuente en la mayoría de los casos proviene de la minería.                    | < 1 mg/L                              | En pequeñas cantidades puede causar problemas respiratorios y en altas concentraciones daño al hígado.  |
| <b>Cobre</b>     | Cobre es un elemento natural que se obtiene de las industrias y la agricultura. | < 1 mg/L                              | Exposición en largo periodo pueden causar irritación a la nariz y garganta.   |
| <b>Potasio</b>   | Elemento de origen natural muy cuantioso en la corteza terrestre.               | < 500 mg /L                           | Causa irritación al aparato respiratorio.   |
| <b>Manganeso</b> | Elemento que se oxida en el aire y es utilizado para la fabricación de acero.   | < 0,1 mg/L                            | En grandes cantidades puede causar daño a los pulmones y Parkinson.   |
| <b>Níquel</b>    |   |                                       |   |

|                  |   |              |   |
|------------------|---|--------------|---|
|                  | Elemento que se utiliza para fundición de hierro, acero y minería.            | < 0,025 mg/L | En altas cantidades causa danos al sistema respiratorio.  |
| <b>Plomo</b>     | Elemento que se utiliza para las refineras, pintura, accesorios de vehículos. | < 0,05 mg/L  | Puede causar efectos como incremento en la presión sanguínea y perturbación al sistema nervioso.                      |
| <b>Estroncio</b> | De los menos abundantes en la naturaleza es utilizado para la pirotecnia.     | < 1 mg/L     | Elemento peligroso puede causar cáncer de pulmón.   |
| <b>Zinc</b>      | Utilizado en fundición, minerías industrias textiles.                         | < 5 mg/L     | Niveles alto de Zinc puede ocasionar daños al páncreas y metabolismo.   |
| <b>Calcio</b>    | El calcio metálico es utilizado en la industria para electrolisis.            | < 200 mg /L  | El exceso pude ocasionar daño a los riñones, esclerosis y problemas en los vasos sanguíneos.                          |
| <b>Hierro</b>    | Metal natural es utilizado para la construcción de aceros estructurales.      | < 1 mg/L     | Puede provocar conjuntivitis y retinitis si existe contacto.  |
| <b>Aluminio</b>  | Elemento abundante que es utilizado para varios usos industriales.            | < 0,2 mg/L   | En altas concentraciones causa daño al sistema nervioso central, Demencia, Pérdida de la memoria y Temblores severos. |
| <b>Sodio</b>     | Elemento de origen natural que lo puede entrar en mares, lagos y manantiales. | < 200 mg /L  | Irritación de fosas nasales y garganta.   |

|                 |  |                                |   |
|-----------------|--|--------------------------------|---|
|                 |  |                                |   |
| <b>Litio</b>    | Se utiliza este elemento para lubricantes y grasas.                              | < 2,5 mg/L                     | Es corrosivo para los ojos y piel.  |
| <b>Plata</b>    | Minería e industria fotográfica.   | < 0,05 mg/L                    | Puede causar molestias estomacales, náuseas, vómitos, diarrea e incluso la muerte.                            |
| <b>Magnesio</b> | Uno de los más abundantes en la naturaleza, utilizado para industrias metálicas. | 1,8 - 3 mg /100cm <sup>3</sup> | Puede irritar las membranas mucosas o aparato respiratorio.   |
| <b>Vanadio</b>  | Utilizado en la industria química y en cerámica.                                 | < 0,1 mg/L                     | En altas concentraciones ocasiona bronquitis y neumonía.  |
| <b>Azufre</b>   | Elemento de fuente natural que se combina con otros en estado de oxidación.      | < 250 mg/L                     | Causa efectos neurológicos, alteración en la circulación sanguínea y alteraciones en el metabolismo hormonal. |
| <b>Arsénico</b> | El arsénico se encuentra en la naturaleza y es utilizado para varios             | < 0,05 mg/L                    | Afecta a todos los órganos del cuerpo y se manifiesta con lesiones cutáneas.                                  |

|                |  |              |   |
|----------------|--|--------------|---|
|                | capos como la pirotecnia.  |              |   |
| <b>Silicio</b> | El silicio se encuentra de manera natural, sirve para dar más resistencia a otros metales. | < 3100 mg/kg | Causa efectos crónicos en la respiración. |

Los únicos elementos que no pueden medirse con los métodos de ICP son C, H, O, N y los halógenos.

### 3.6.3 Medición de Aniones

Además de los metales, se analizó aniones de cuatro tipos (nitratos, fosfatos, sulfatos y amonio) en el agua lluvia, pero solo en las muestras del segundo trimestre debido a que en el primer trimestre no se tuvo gran cantidad de muestra. El procedimiento consiste en colocar un reactivo como ácido clorhídrico (HCl) para liberar los aniones del agua y de esta manera introducirlo en el espectrofotómetro, el cual nos da una absorbancia o también llamada intensidad de la concentración, así el aparato lee y se extrapola con una curva de calibración para dar resultados en miligramos por litro.

### 3.7 Agrupación de datos y regresiones lineales

Los valores obtenidos se registraron en tablas para una mayor identificación de cada metal encontrado en el análisis, además teniendo en cuenta la fecha de las muestras divididas en 2 etapas: primer trimestre 2019 y segundo trimestre 2019. Diferenciación de los eventos de precipitación por su intensidad, es decir que es mayor o igual a los 9 mm o menor, definidos como fuerte y liviano, respectivamente. Para verificar si existe diferencia significativa utilizando el método ANOVA, además se agregaron resultados obtenidos en Valle de los Chillos y Sur de la ciudad de dos días en cada lugar obteniendo datos de metales y aniones en el segundo trimestre.

Se realizaron modelos de regresiones lineales con cada metal de acorde a la precipitación de cada día con el objetivo de explicar las relaciones entre las variables independientes y de respuesta y también el comportamiento del metal en los diferentes días.

En la regresión lineal de cada metal a ser analizado en las diferentes fechas cuya se tendrá en cuenta el valor de R cuya ecuación es  $y = ax + b$  debido a que  $R > \pm 0.5$  con este valor podremos saber si existe una anticorrelación (-) o una correlación (+) con las variables.

### **3.8 Utilización Modelo HYSPLIT**

Además, se utilizó el modelo Hysplit también conocido como modelo Híbrido Lagrangiano de Trayectoria Integrada de Partícula Única por sus siglas en inglés (Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory – HYSPLIT) para organizar el transporte de masas de aire, útil para calcular las trayectorias progresivas del viento y cómo influyen en la concentración de metales pesados.

HYSPLIT es uno de los programas que más se utiliza para calcular la trayectoria atmosférica y dispersión se puede ejecutar actualmente en plataformas PC, Mac o Linux utilizando un único procesador. Los cálculos de entornos paralelos de múltiples procesadores basados en una implementación de interfaz de paso de mensajes (MPI) están disponibles para Mac y Linux (Stein et al. 2015). De esta manera pudimos observar de donde provienen los contaminantes a lo largo del estudio.

### **3.9 Comparación de resultados**

Finalmente se realizó un esfuerzo extra para poder obtener los resultados de otros lugares de la ciudad, debido a que solo se tenía el pluviómetro convencional en Floresta, de esta manera se realizaron cuatro muestras entre Valle de los Chillos y sur de Quito el segundo trimestre de estudio, el cual fue útil para comparar con nuestros resultados tanto en aniones como en concentración de metales.

## **4 CAPITULO IV. RESULTADOS Y ANÁLISIS**

### **4.1 Información general**

Los metales se pueden presentar en el ambiente ya sea de manera natural o antropogénicas, los cuales se pueden mover por aire, agua y suelo. Estos metales suelen ser persistentes debido a que no pueden ser reducidos por procesos biológicos ni por el ser humano (Reyes, Vergara, and Torres 2016).

Se ha desarrollado numerosos estudios en ciudades los cuales consideran varios contaminantes y grupos de fuentes naturales y humanas de esta manera se conoce que el PM es el mejor indicador para los efectos de la polución del aire ambiental en la salud de las personas (Karagulian et al. 2015).

La deposición atmosférica controla la contaminación en el aire, la deposición húmeda se los denomina también barrido de lluvia o nieve y sirve como lavada por la eliminación de partículas debajo de la nube por las gotas de lluvia (Wu et al. 2018).

Con las muestras recogidas se obtuvieron datos de precipitación (mm/día) en 2 diferentes épocas del año en la Floresta (zona centro norte), de Quito las cuales fueron comparadas con otras dos locales como se observa en la Figura 17. Una de las estaciones contienen datos más completos de contaminación del aire y parámetros meteorológicos y está ubicada en la zona Belisario (coord.78°29'24" W, 139 0°10'48" S). Esta estación es parte de la red de monitoreo REMMAQ del DMQ. Además recogimos datos desde el 26 de mayo del 2019, desde otra estación meteorológica del Campus Udla Colón (coord.78°29'5.59"W, 0°12'9.06"S). Estos dos sitios son los más cercanos para validar nuestros datos entre si teniendo un entorno altamente urbanizado.

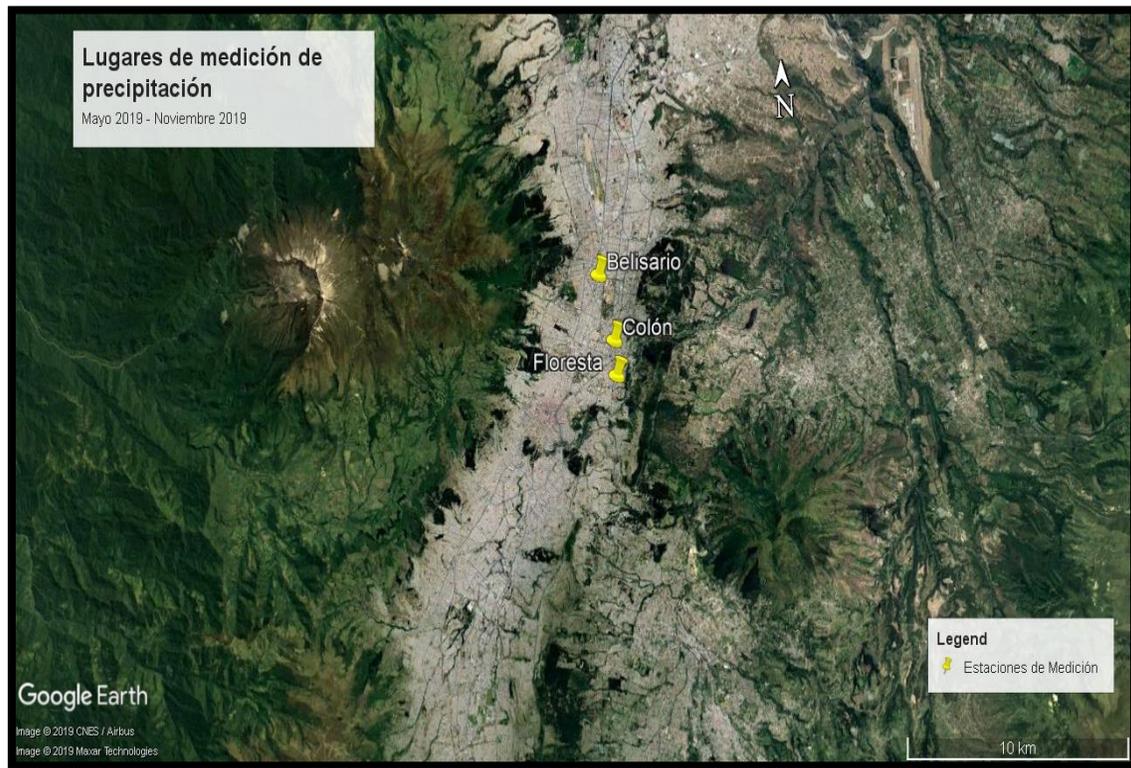


Figura 14. Lugares en los que se obtuvieron datos.

Adaptado de Google Earth 2019

#### 4.2 Resultados de precipitación mayo a noviembre 2019 en tres estaciones

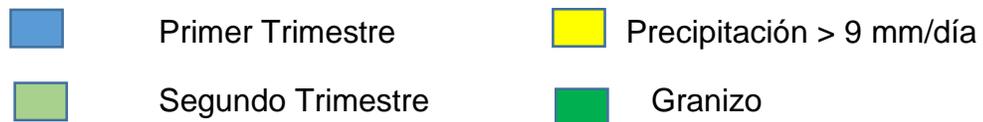
Tabla 3.

*Precipitación en los 2 semestres para las 3 estaciones.*

| Fecha    | Volumen | Floresta | Belisario | Colón |
|----------|---------|----------|-----------|-------|
|          | ml      | mm       | mm        | mm    |
| 9 mayo   | 37.5    | 0.86     | 0.2       | 0     |
| 10 mayo  | 125     | 2.88     | 0.2       | 0     |
| 11 mayo  | 30      | 0.69     | 0         | 0     |
| 13 mayo  | 180     | 4.15     | 6.5       | 0     |
| 14 mayo  | 46      | 1.06     | 0.7       | 0     |
| 19 Mayo  | 450     | 10.37    | 23.6      | 0     |
| 26 mayo  | 130     | 3        | 2.2       | 2     |
| 11 junio | 210     | 4.84     | 2.4       | 3     |

|               |      |       |      |      |
|---------------|------|-------|------|------|
| 14 junio      | 115  | 2.65  | 1.9  | 7    |
| 13 julio      | 160  | 3.69  | 7.6  | 5.5  |
| 19 septiembre | 800  | 18.44 | 15.1 | 12   |
| 23 septiembre | 90   | 2.07  | 1.2  | 1    |
| 24 septiembre | 1100 | 25.36 | 29.7 | 23   |
| 29 septiembre | 600  | 13.83 | 7.8  | 10   |
| 7 octubre     | 300  | 6.92  | 6.4  | 4.5  |
| 13 octubre    | 175  | 4.03  | 3    | 4    |
| 17 octubre    | 600  | 13.83 | 5.6  | 13   |
| 19 octubre    | 250  | 5.76  | 3.7  | 0.5  |
| 22 octubre    | 800  | 18.44 | 21.5 | 12   |
| 23 octubre    | 300  | 6.92  | 3.1  | 6    |
| 24 octubre    | 175  | 4.03  | 2.4  | 4    |
| 1 noviembre   | 350  | 8.07  | 14.1 | 17   |
| 6 noviembre   | 450  | 10.37 | 15   | 11.5 |
| 10 noviembre  | 455  | 10.49 | 7.4  | 4    |
| 11 noviembre  | 575  | 13.26 | 25.9 | 4    |
| 12 noviembre  | 455  | 10.49 | 5.5  | 4    |
| 13 noviembre  | 800  | 18.44 | 30.5 | -    |

Donde:



#### 4.2.1 Correlaciones lineales de precipitación en tres estaciones

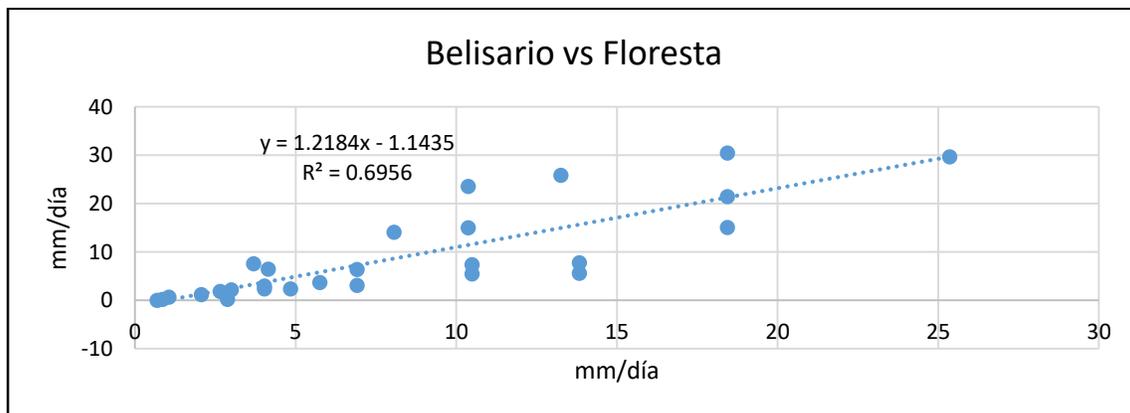


Figura 15. Correlación lineal entre Belisario y Floresta.

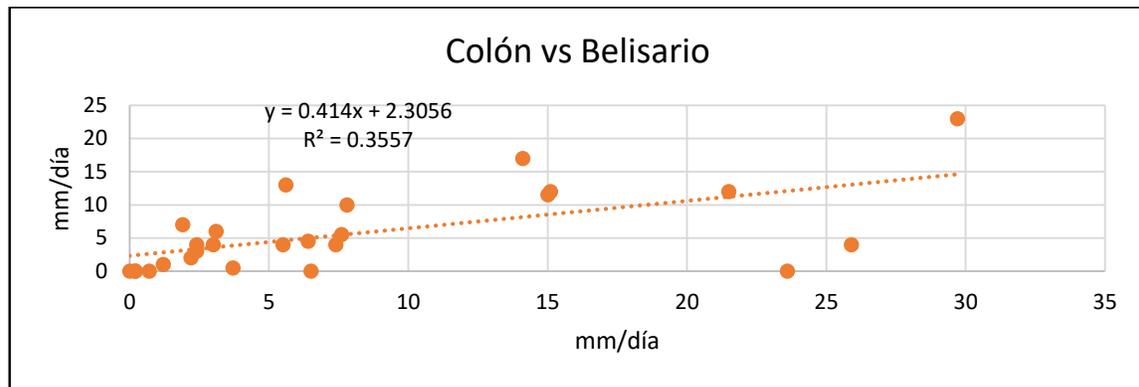


Figura 16. Correlación lineal entre Belisario y Colón.

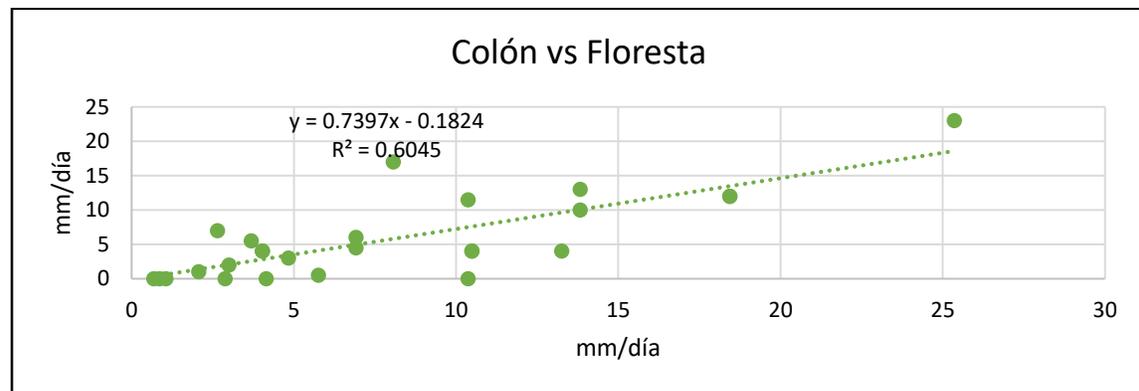


Figura 17. Correlación lineal entre Floresta y Colón.

Para comprender el comportamiento de precipitación en una zona urbana, sabemos que los climas urbanos se distinguen de otras zonas por las diferencias de la temperatura en el aire, humedad, dirección y velocidad del viento y por su puesto la cantidad de precipitación. Todas estas diferencias meteorológicas son atribuibles en gran parte a la alteración del terreno natural a través de la construcción de estructuras y superficies artificiales. Por ejemplo, los edificios altos, las calles pavimentadas y los estacionamientos afectan el flujo del viento, la escorrentía de las precipitaciones y el equilibrio energético de una localidad (Matthews 2014).

Como podemos observar en las Figuras 15, 16 y 17 la precipitación en los tres lugares donde se tiene datos son muy similares, teniendo una tendencia positiva,

porque ambas variables van aumentando constantemente. Con unas correlaciones moderadas a altas entre Colon y Belisario  $r= 0,59$ , Belisario y Floresta  $r=0,83$  y Floresta y Colón  $r=0,77$ . Sin embargo existen días en los cuales a pesar de la cercanía de las estaciones en unos lugares llueve y en otros no, como sucede en el mes de julio en donde se tienen variaciones en milímetros de precipitación por día en los 3 lugares. Esto se debe a la existencia de microclimas en la ciudad es decir la creación de condiciones ambientales locales que son influenciadas por parámetros como la cantidad de vegetación, morfología urbana y fuentes de calor causada por los habitantes (Cordero Ordóñez 2014).

#### **4.2.2 Discusión resultados de precipitación mayo a noviembre 2019**

Quito es una ciudad conocida por sus microclimas. Cada sector geográfico de la ciudad posee un clima particular que lo diferencia de otros. De ahí que resulta bastante común que haya una radiante tarde de sol en el centro–norte, mientras llueve en el sur, hay sol y sombra en el Valle de Pomasqui o Tumbaco y la neblina se aposenta sobre San Antonio de Pichincha y la Mitad del Mundo (Nuñez, 2016).

Según investigaciones (Matthews 2014) las características de la atmósfera sobre los centros urbanos son concentraciones más altas de contaminantes como el  $CO$ ,  $SO_x$ ,  $NO_x$  además de hidrocarburos, oxidantes y partículas. Las concentraciones de contaminación urbana dependen de la magnitud de las fuentes de emisiones locales y de la ventilación meteorológica predominante del área, es decir, la altura de la capa atmosférica a través de la cual se mezclan los contaminantes y la velocidad promedio del viento a través de esa capa.

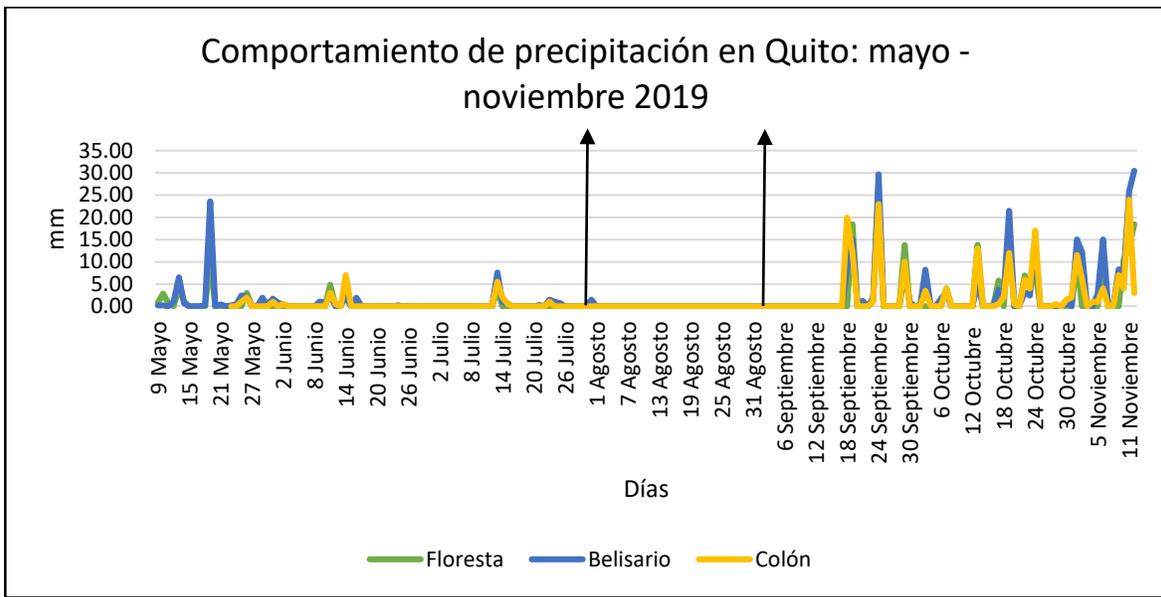


Figura 18. Comportamiento de la precipitación en Quito mayo a noviembre.

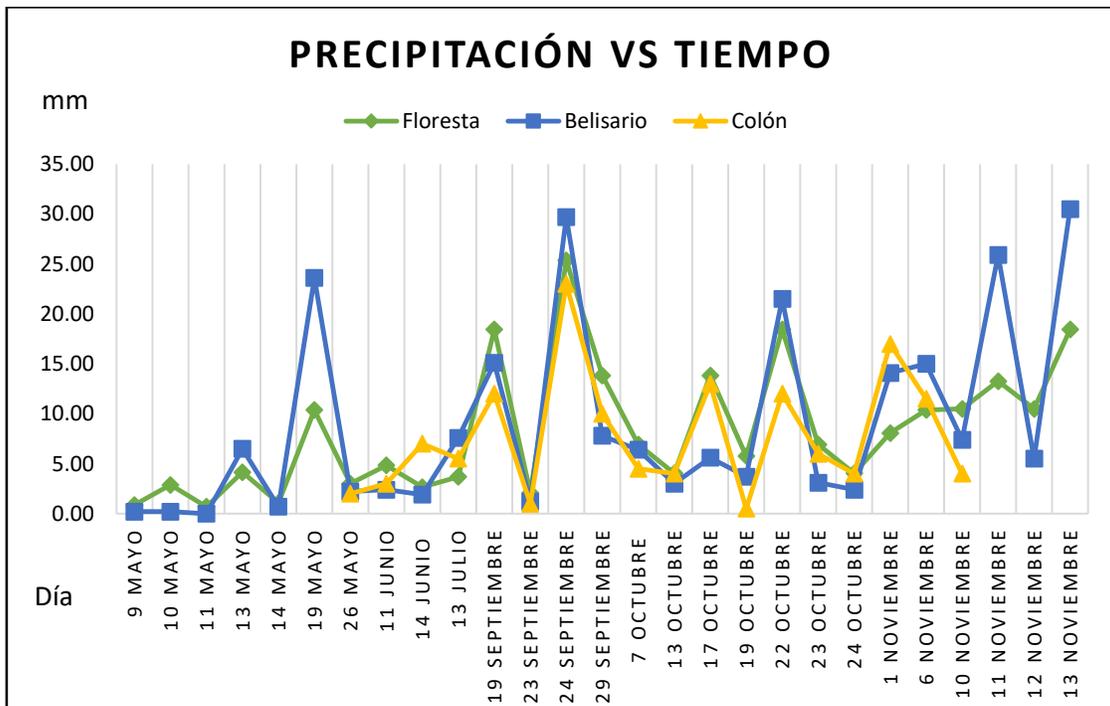


Figura 19. Precipitación (mm/día) vs fecha acorde a las series temporales de eventos de precipitación durante el período de estudio.

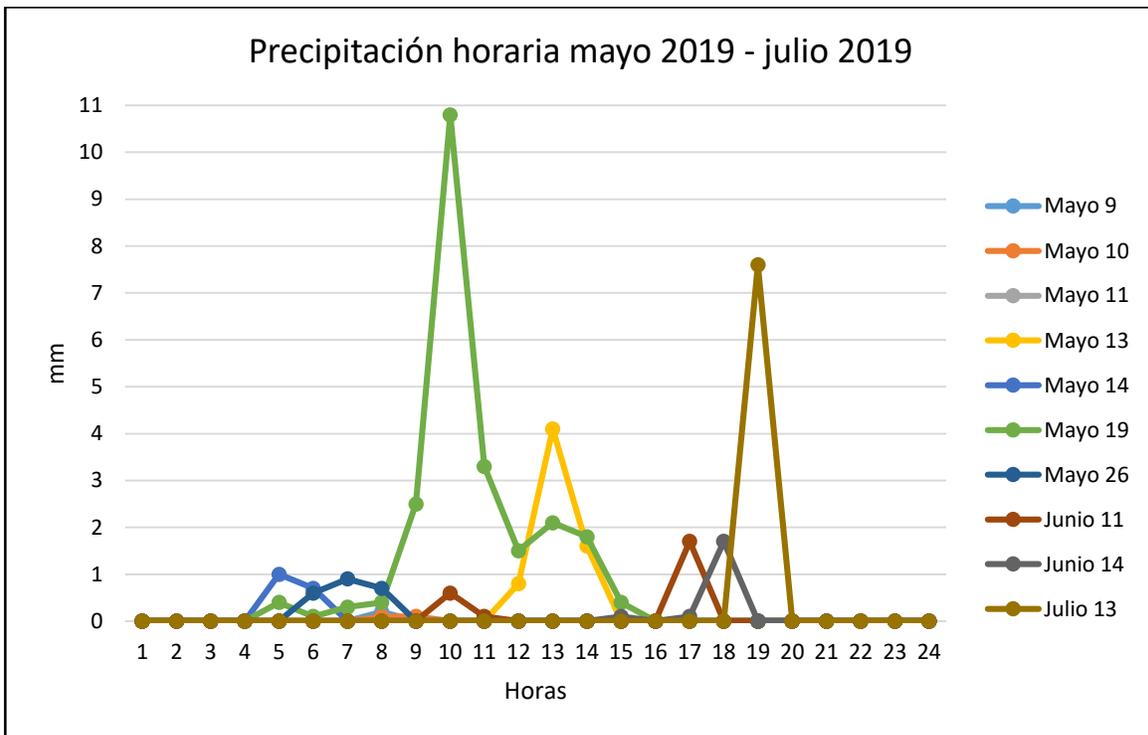
Según la Figura 18 tenemos el comportamiento de precipitación en la ciudad de Quito de 3 lugares de estudio. Los datos de precipitación se han dividido en 2 trimestres, el primero desde mayo a julio y el segundo desde septiembre a noviembre sin contar con el mes de agosto que es el mes seco.

Se determinó claramente una elevada concentración de lluvia con tendencia a mantenerse en el segundo trimestre, siendo el punto más alto en el mes de septiembre que sobrepasa los 20 milímetros de lluvia en los 3 lugares que se tienen datos en Figura 19.

Según el INAMHI (Palacios and Rosero 2014) en la zona interandina la precipitación es de dos tipos, es decir de enero a mayo y de septiembre a noviembre con presencia de lluvias a diferencia desde junio a agosto con fase seca. Como se puede ver de resultados. En Quito la precipitación ocurre de la misma manera, se divide en período lluvioso entre enero-mayo; septiembre - noviembre y el período seco entre junio-agosto.

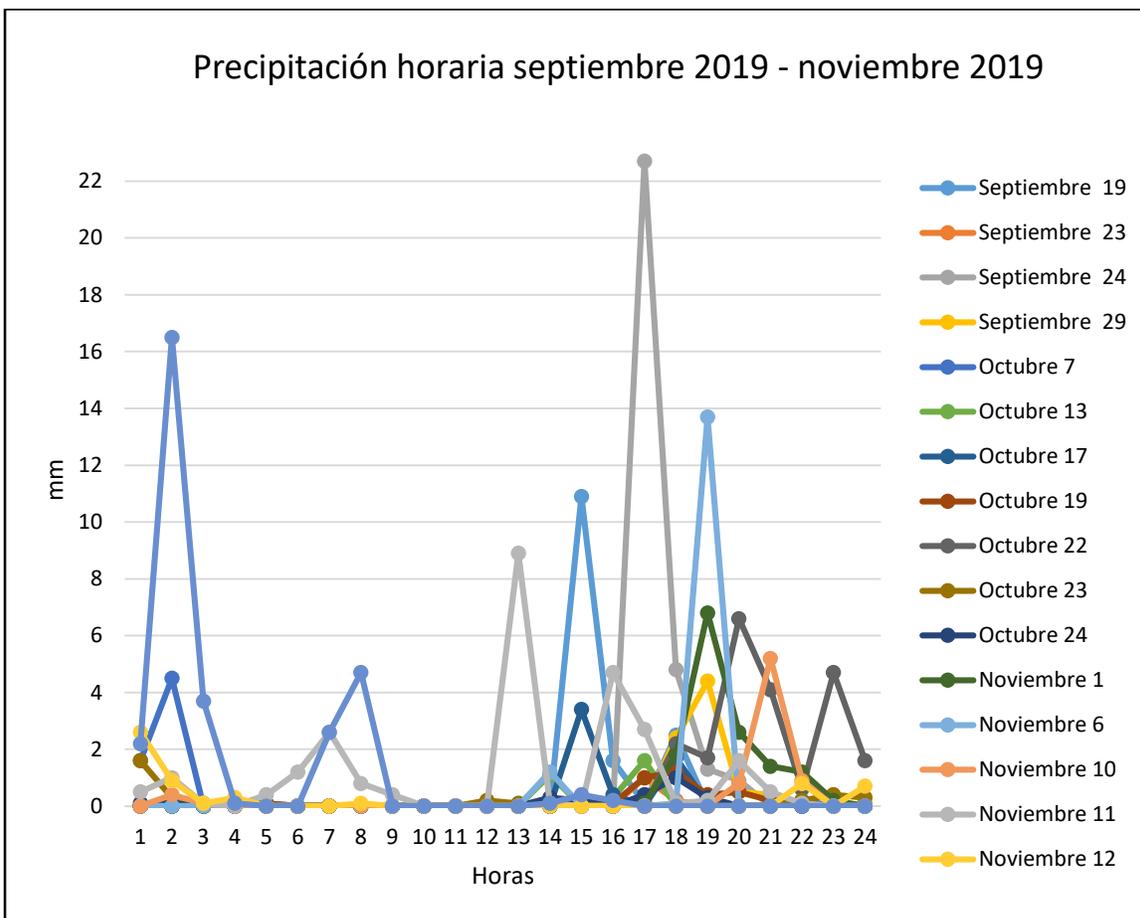
#### **4.3 Estación Meteorológica Belisario – Secretaria de Ambiente del DMQ**

Los datos por hora de las precipitaciones en los dos trimestres de estudio fueron obtenidos desde el portal web de la Secretaría de Ambiente y ajustado en tablas para mayor facilidad de trabajo y organizado en gráficos para una mejor comparación e interpretación como se muestra en la Figura 20.



*Figura 20.* Precipitación (mm) vs horas en Estación Belisario en primer semestre de estudio.

Según la Figura 20 los datos obtenidos por cada hora en la estación meteorológica Belisario de la Secretaría de Ambiente del DMQ muestra que en el primer trimestre se tiene una tendencia de lluvia entre las 5:00 a 19:30 horas con valores que van desde 0,1 mm/hora a 10,8 mm/hora, siendo el punto más alto el 19 de mayo a las 10 am con un valor de 10.8 mm/día.



*Figura 21.* Precipitación (mm) vs Horas en Estación Belisario en segundo semestre de estudio.

En contrario según Figura 21 de los datos obtenidos por cada horarios en el segundo trimestre en la estación meteorológica Belisario de la Secretaría de Ambiente del DMQ, la precipitación varía mucho pero tiene una tendencia de lluvia entre las 13:00 a 23:00 que varían con intensidades entre 0.1 mm/hora a 22.7 mm/hora, siendo el último punto más alto el día 24 de septiembre a las 17:00 horas.

#### 4.3.1 Análisis gráficos de estación Belisario

En las Figuras 20 y 21 de precipitación en los 2 semestres de recolección únicamente se tiene valores en los días que se tuvieron muestras en Floresta. Se

tienen valores en mm por las 24 horas del día todos estos datos obtenidos en la estación meteorológica Belisario de la Secretaría de Ambiente del DMQ

Según las investigaciones de (Wallace and Hobbs 2006), las ciudades más grandes generan y almacenan tanto calor que pueden crear capas mixtas convectivas sobre ellas, tanto de día como de noche, cuando hace buen tiempo. Esta fuente de calor urbana a menudo se asocia con mejoras térmicas y corrientes ascendentes sobre la ciudad, con corrientes descendentes de circulación de retorno débiles sobre el campo adyacente. Un efecto perjudicial es que los contaminantes se recirculan continuamente a la ciudad. Además, la convección mejorada sobre una ciudad puede causar aumentos en las nubes convectivas y la lluvia de tormentas eléctricas. De esta manera es normal que las lluvias se comporten de esta manera en una zona urbana y en épocas invernales teniendo una tendencia a tener más acumulación de precipitación en horas de la tarde y noche con picos altos.

Finalmente, en Belisario (y en el resto de Quito), hay menos variación diurna en las concentraciones de  $PM_{2.5}$  durante los días con eventos de precipitación o falta de pico de tráfico en la hora pico. Las concentraciones de  $PM_{2.5}$  disminuyen durante los días con eventos de lluvia, lo que indica el efecto de limpieza de la precipitación. En el sitio central de Belisario, ocupado por el tráfico, además, el pico de la hora pico de la mañana cambia una hora más tarde, lo que puede explicarse por un aumento en el tráfico en general o el colapso del tráfico (Zalakeviciute, López-Villada, et al. 2018).

#### **4.4 Estación Meteorológica Udla-Colón**

La estación UDLA-Colón está cerca del sitio experimental en Floresta. En este caso tenemos menos datos porque UDLA-Colón se instaló desde mayo, al contrario de Belisario que tiene datos desde el año 2003. Los valores están por día en más alta resolución en intervalos de 10 minutos de las precipitaciones. Durante los dos trimestres de estudio los datos fueron obtenidos en el almacenamiento de información de la estación meteorológica UDLA-Colón siendo ajustado en tablas

para mayor facilidad de trabajo y organizado en gráficos para una mejor interpretación y comparación como se muestra en la Figura 22.

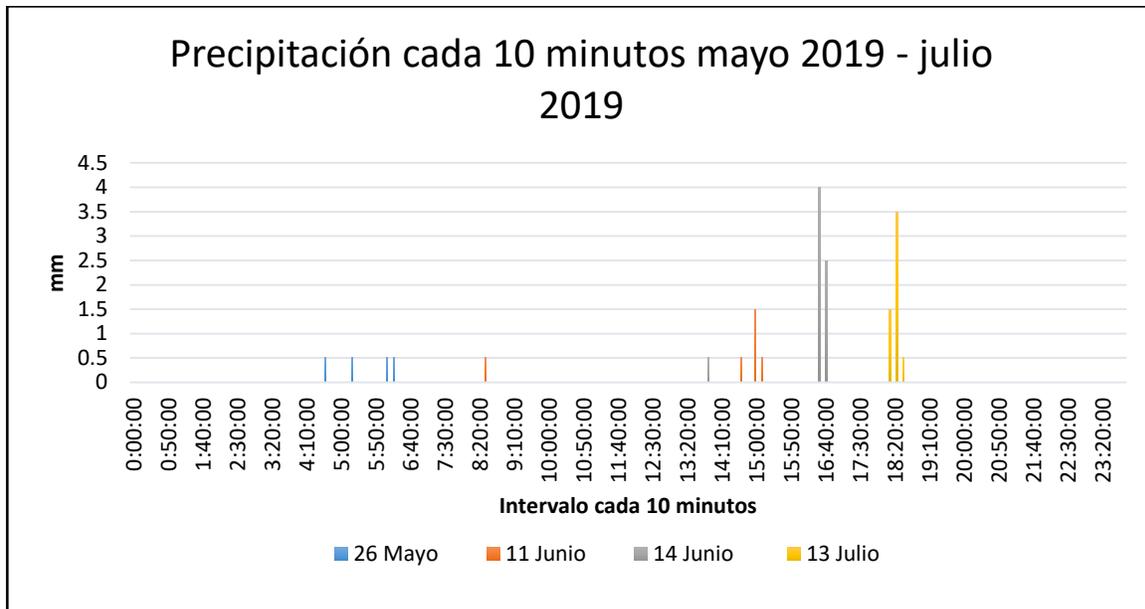
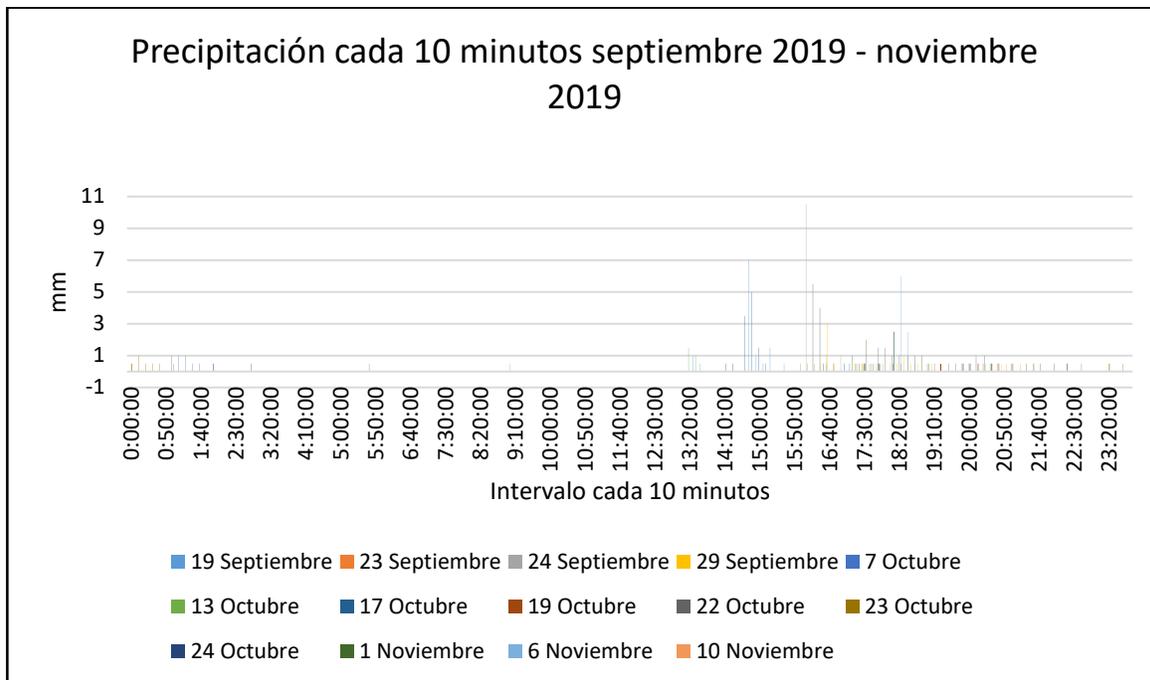


Figura 22. Precipitación (mm) vs Tiempo de un día en intervalo de 10 minutos del primer trimestre en Estación Udla-Colón.

Los valores obtenidos en el primer trimestre mayo 2019- julio 2019 de Figura 22 nos muestra que hay mayor intensidad de lluvia con valores entre 0,5 a 4 mm/10 min en el rango de las 14:00 a 19:00 horas, entre junio y julio siendo así el valor máximo de 4 mm/10 min a las 16:30 del 14 de junio de 2019 a diferencia del mes de mayo que tiene bajas intensidades con valores máximo de 0,5 mm entre las 4:30 y 6:40 de la mañana siendo el valor máximo 0,5 mm/10 min en todos los días que se obtuvieron muestras en el mes de mayo. En esta región de gran altitud a menudo está cubierta por nubes durante las horas oscuras del día. Esto a su vez confirma sobre la categorización de la intensidad del evento de lluvia, que muestra un aumento en las concentraciones de  $PM_{2.5}$  durante la acumulación mínima de lluvia a las 9:00-12:00. (Yu et al. 2016) Esto último depende de la radiación solar, que se reduce durante los días lluviosos, debido a una mayor cobertura de nubes y

debido a la transferencia de productos que contienen  $NO_2$  a la fase de partículas durante los eventos de alta HR.



*Figura 23.* Precipitación (mm) vs Tiempo de un día en intervalo de 10 minutos del segundo trimestre en Estación Udla-Colón.

Los valores obtenidos en el segundo trimestre septiembre 2019 –noviembre 2019 en la Figura 23 nos muestra que hay mayor intensidad de lluvia con valores que están entre 0,5 a 10 mm/10 min en un rango de acumulación que está desde las 13:20 a 23:40 horas, entre septiembre y noviembre siendo el valor más alto de 10,5 mm/10 min el día 24 de septiembre de 2019 a las 16:10, a diferencia del mes de octubre que en su mayoría de días tuvo lluvias que no superaban el valor de 1 mm/10 min en especial en horas de la madrugada.

En ambos trimestres las lluvias tienden a acumularse más en horas de la tarde y noche es decir entre las 14:00 a 23:00, caso contrario pasa en las horas de la madrugada y en la mañana entre las 0:00 a 13:00 con lluvias esporádicas. Esto debido a que en las noches en una ciudad de altura cuando las laderas de las

montañas se enfrían por la radiación de onda larga y el aire frío se acumula se forma niebla. Además según (Wallace and Hobbs 2006) la radiación tiene un papel muy importante por el sol, la atmósfera sobre él, las superficies se calientan más fuertemente por la absorción de radiación solar y la energía obtenida durante las horas del día se pierde a medida que anochece.

#### 4.4.1 Temperatura

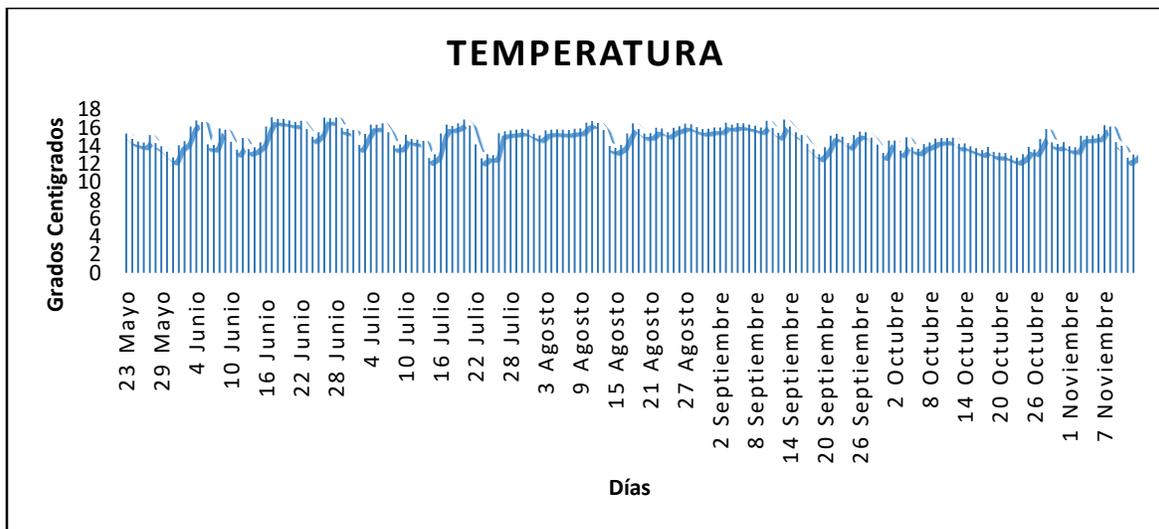
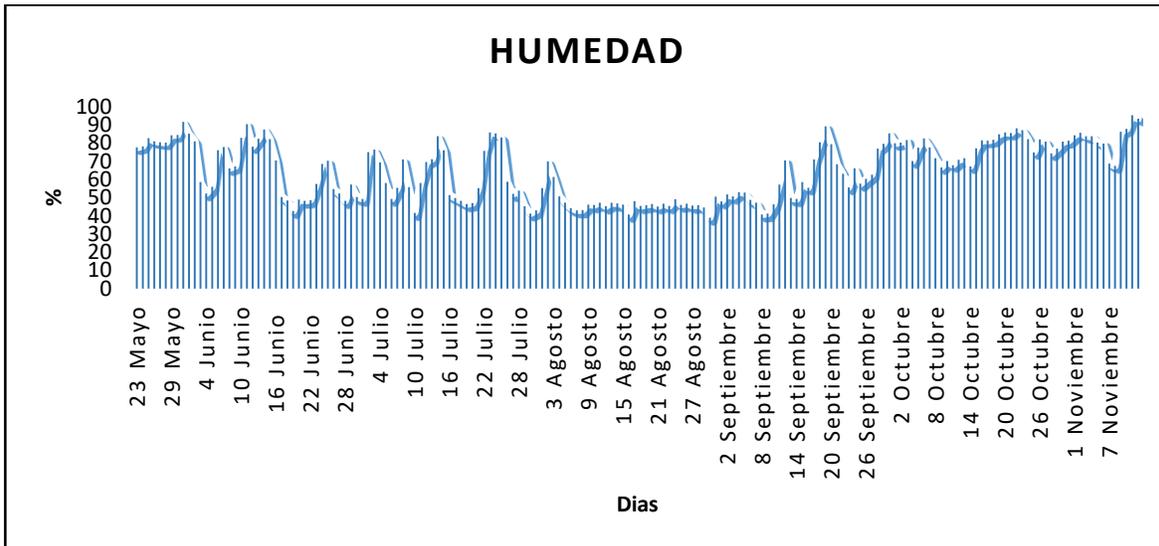


Figura 24. Datos de temperatura promedio por día entre mayo a junio 2019 desde estación Colón.

La temperatura medida en la estación Colón en la Figura 24 fue registrada con datos por cada 10 minutos en un rango de 24 horas, para mayor facilidad de los datos se realizó un promedio diario desde mayo a noviembre, mostrando una tendencia de temperatura que varía entre 12 y 16 grados centígrados. De acuerdo con un estudio previo (DMQ 2008) el DMQ tiene entre 15 tipos de clima que varían según su ubicación y altitud. El más asemejado en las zonas de medición es el clima ecuatorial frío semi húmedo con precipitaciones que varían entre 500 y 1.000 milímetros anuales, con una temperatura promedio anual entre 8 y 12°C.

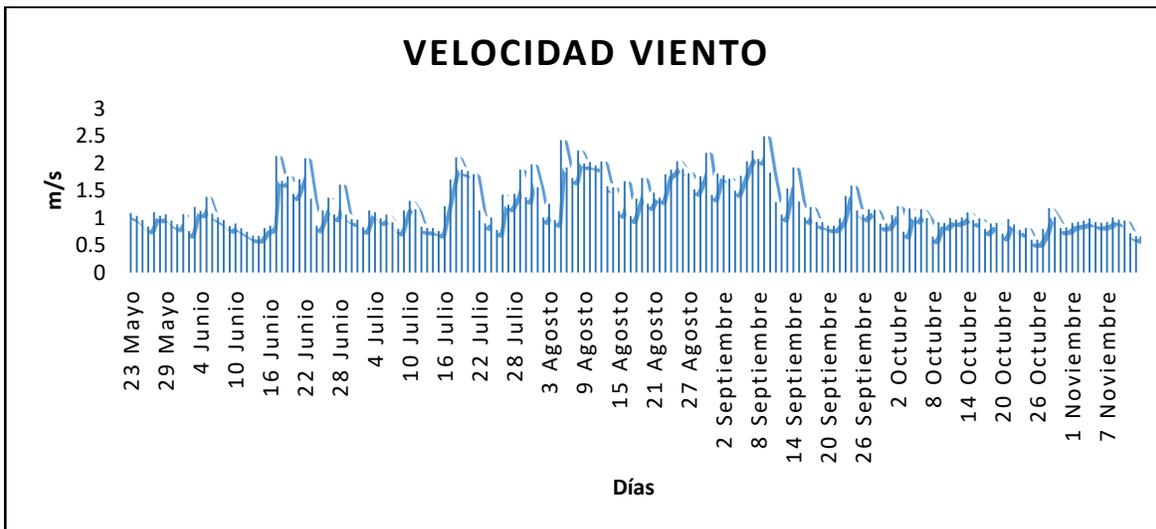
#### 4.4.2 Humedad



*Figura 25.* Datos de humedad promedio por día entre mayo a junio 2019 desde estación Colón.

El porcentaje de humedad medida en la estación Colón en Figura 25 fue registrada con datos por cada 10 minutos en un rango de 24 horas, para mayor facilidad de los datos se realizó un promedio diario que va desde mayo a noviembre, mostrando una tendencia de humedad que varía significativamente especialmente en el mes de agosto en el cual se tiene un promedio de 50% de humedad, a diferencia de los demás meses que se tiene valores de 80% en adelante. Según un artículo relacionado el DMQ por su altitud sobre el nivel del mar, Quito perteneces a la zona ecuatorial templada con algunas variaciones y cambios en la temperatura a lo largo del día. Según las horas, la humedad relativa varía muy poco, cerca de 76%, y con presión atmosférica promedio de 548 mbar (DMQ 2008).

#### 4.4.3 Velocidad del viento



*Figura 26.* Datos de velocidad de viento promedio por día entre mayo a junio 2019 desde estación Colón.

La velocidad del viento medida en la estación Colón en Figura 26 fue registrada con datos por cada 10 minutos en un rango de 24 horas. Para mayor facilidad de los datos también se realizó un promedio diario desde mayo a noviembre, mostrando una tendencia de velocidad de viento que varía acorde a la época. En el caso de los meses de verano (julio, agosto e inicios de septiembre) superan los 2 m/s a diferencia de los otros meses que son menos a 1 m/s. Los fuertes vientos se dan en la temporada de verano cuando también hay baja humedad que llega al 30% y temperaturas que superan los 25° C (El Comercio, 2014).

#### 4.5 Relación entre metales, meteorología y compuestos químicos en dos estaciones

Tabla 4

Coeficiente de correlación de meteorología, contaminantes criterio de Belisario y metales de Floresta.

|            | B     | Ba   | Bi   | Ca   | Cl    | Cu   | K      | Mn     | Pb   | Sr   | Zn   | Ca   | Fe   | Al   | Nb   | Li    | Ag    | Ga   | In   | Mg   | V    | Te   | Se   | S    | P    | Si   | As   | CO   | SO2  | NO2 | Conoc | PM2.5 | Humedad | Temp | Vel Viento | Precip |  |  |  |  |
|------------|-------|------|------|------|-------|------|--------|--------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|-------|-------|---------|------|------------|--------|--|--|--|--|
| B          | 1     |      |      |      |       |      |        |        |      |      |      |      |      |      |      |       |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |     |       |       |         |      |            |        |  |  |  |  |
| Ba         | 0.49  | 1    |      |      |       |      |        |        |      |      |      |      |      |      |      |       |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |     |       |       |         |      |            |        |  |  |  |  |
| Bi         | 0.34  | 0.61 | 1    |      |       |      |        |        |      |      |      |      |      |      |      |       |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |     |       |       |         |      |            |        |  |  |  |  |
| Ca         | 0.31  | -0.1 | 0.3  | 1    |       |      |        |        |      |      |      |      |      |      |      |       |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |     |       |       |         |      |            |        |  |  |  |  |
| Cl         | 0.25  | 0.05 | 0.1  | 0.1  | 1     |      |        |        |      |      |      |      |      |      |      |       |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |     |       |       |         |      |            |        |  |  |  |  |
| Cu         | -0.58 | -0.3 | -0.6 | -0.4 | -0.4  | 1    |        |        |      |      |      |      |      |      |      |       |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |     |       |       |         |      |            |        |  |  |  |  |
| K          | 0.54  | 0.07 | 0.1  | 0.8  | 0.444 | -0.3 | 1      |        |      |      |      |      |      |      |      |       |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |     |       |       |         |      |            |        |  |  |  |  |
| Mn         | 0.55  | 0.41 | 0.1  | 0.4  | 0.2   | -0.4 | 0.735  | 1      |      |      |      |      |      |      |      |       |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |     |       |       |         |      |            |        |  |  |  |  |
| Ni         | 0.64  | 0.28 | 0.6  | 0.5  | 0.78  | -0.8 | 0.801  | 0.538  | 1    |      |      |      |      |      |      |       |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |     |       |       |         |      |            |        |  |  |  |  |
| Pb         | -0.5  | -0.3 | -0.5 | -0.4 | -0.14 | 0.57 | -0.297 | -0.341 | 1    |      |      |      |      |      |      |       |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |     |       |       |         |      |            |        |  |  |  |  |
| Sr         | 0.72  | 0.22 | 0.3  | 0.7  | 0.346 | -0.7 | 0.787  | 0.784  | -0.5 | 1    |      |      |      |      |      |       |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |     |       |       |         |      |            |        |  |  |  |  |
| Zn         | -0.2  | -0.3 | -0.5 | 0.1  | 0.0   | 0.4  | 0.0    | 0.2    | 0.1  | 0.1  | 1    |      |      |      |      |       |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |     |       |       |         |      |            |        |  |  |  |  |
| Ca         | 0.63  | 0.27 | 0.3  | 0.6  | 0.1   | -0.6 | 0.5    | 0.7    | -0.5 | 0.8  | 0.0  | 1    |      |      |      |       |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |     |       |       |         |      |            |        |  |  |  |  |
| Fe         | 0.28  | 0.05 | -0.1 | 0.1  | 0.0   | -0.2 | 0.0    | 0.7    | -0.3 | 0.5  | 0.4  | 0.4  | 1    |      |      |       |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |     |       |       |         |      |            |        |  |  |  |  |
| Al         | -0.6  | -0.2 | -0.7 | -0.6 | 0.0   | 0.3  | -0.4   | -0.2   | 0.6  | -0.6 | 0.4  | -0.6 | 0.0  | 1    |      |       |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |     |       |       |         |      |            |        |  |  |  |  |
| Nb         | 0.43  | 0    | 0.0  | 0.6  | 0.6   | -0.3 | 0.8    | 0.5    | -0.2 | 0.8  | 0.0  | 0.5  | 0.3  | -0.2 | 1    |       |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |     |       |       |         |      |            |        |  |  |  |  |
| Li         | 0.68  | 0.26 | 0.5  | 0.6  | 0.2   | -0.8 | 0.5    | 0.5    | -0.6 | 0.8  | -0.3 | 0.8  | 0.3  | -0.3 | 0.4  | 1     |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |     |       |       |         |      |            |        |  |  |  |  |
| Ag         | 0.04  | 0.47 | 0.6  | 0.1  | -0.1  | -0.2 | 0.0    | 0.1    | -0.2 | 0.1  | -0.1 | 0.2  | 0.1  | 0.2  | -0.1 | -0.03 | 1     |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |     |       |       |         |      |            |        |  |  |  |  |
| Ga         | 0.31  | 0.51 | 0.5  | -0.1 | 0.4   | -0.3 | -0.1   | 0.1    | -0.2 | 0.1  | -0.2 | 0.1  | 0.0  | -0.3 | -0.1 | 0.28  | 0.14  | 1    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |     |       |       |         |      |            |        |  |  |  |  |
| In         | 0.65  | 0.41 | 0.6  | 0.3  | -0.1  | -0.8 | 0.1    | 0.5    | -0.5 | 0.6  | -0.2 | 0.5  | 0.4  | -0.7 | 0.1  | 0.79  | 0.17  | 0.3  | 1    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |     |       |       |         |      |            |        |  |  |  |  |
| Mg         | 0.65  | 0.03 | 0.2  | 0.8  | 0.4   | -0.6 | 0.9    | 0.6    | -0.5 | 0.9  | 0.0  | 0.7  | 0.3  | -0.6 | 0.8  | 0.73  | 0.02  | 0    | 0.4  | 1    |      |      |      |      |      |      |      |      |      |     |       |       |         |      |            |        |  |  |  |  |
| V          | -0.5  | -0.4 | -0.7 | -0.3 | 0.2   | 0.8  | 0.0    | -0.3   | 0.4  | -0.4 | 0.4  | -0.5 | -0.2 | 0.8  | 0.0  | -0.71 | -0.27 | -0.3 | -1   | -0.3 | 1    |      |      |      |      |      |      |      |      |     |       |       |         |      |            |        |  |  |  |  |
| Te         | -0.6  | -0.4 | -0.7 | -0.5 | -0.1  | 0.3  | -0.3   | -0.4   | 0.6  | -0.6 | 0.4  | -0.6 | -0.2 | 0.9  | -0.2 | -0.88 | -0.23 | -0.4 | -1   | -0.5 | 0.95 | 1    |      |      |      |      |      |      |      |     |       |       |         |      |            |        |  |  |  |  |
| Se         | 0     | 0.11 | 0.0  | -0.2 | 0.1   | 0.0  | -0.1   | 0.3    | -0.1 | 0.0  | -0.1 | 0.1  | 0.3  | 0.1  | 0.2  | 0.15  | -0.07 | 0.2  | 0.1  | -0   | -0   | -0.1 | 1    |      |      |      |      |      |      |     |       |       |         |      |            |        |  |  |  |  |
| S          | 0.2   | -0.1 | -0.3 | 0.5  | 0.5   | 0.1  | 0.8    | 0.4    | -0.1 | 0.6  | 0.4  | 0.3  | 0.1  | 0.1  | 0.7  | 0.1   | -0.16 | -0.2 | -0   | 0.63 | 0.46 | 0.16 | -0.1 | 1    |      |      |      |      |      |     |       |       |         |      |            |        |  |  |  |  |
| P          | -0.1  | -0.2 | 0.1  | 0.2  | 0.2   | 0.1  | 0.3    | -0.5   | 0.0  | -0.2 | -0.1 | -0.1 | -0.4 | 0.0  | 0.1  | -0.2  | 0.19  | -0.3 | -0   | 0.01 | 0.22 | 0.05 | -0.1 | 0.1  | 1    |      |      |      |      |     |       |       |         |      |            |        |  |  |  |  |
| Si         | 0.34  | -0.1 | 0.7  | 0.6  | -0.2  | 0.9  | 0.3    | -0.2   | 0.7  | 0.2  | 0.4  | 0.1  | -0.2 | 0.8  | -0.1 | -0.1  | -0    | 0.81 | 0.26 | -0.1 | -0.1 | 0.9  | 0.2  | 1    |      |      |      |      |      |     |       |       |         |      |            |        |  |  |  |  |
| As         | 0.1   | -0.2 | -0.1 | 0.2  | 0.4   | -0.2 | 0.2    | 0.4    | -0.1 | 0.4  | 0.0  | 0.3  | 0.6  | 0.0  | 0.7  | 0.2   | 0.0   | -0.1 | 0.1  | 0.3  | -0.1 | -0.2 | 0.4  | 0.2  | -0.1 | 0.3  | 1    |      |      |     |       |       |         |      |            |        |  |  |  |  |
| CO         | -0.5  | -0.3 | -0.3 | -0.3 | 0.0   | 0.4  | -0.1   | -0.4   | 0.2  | -0.4 | 0.0  | -0.5 | -0.2 | 0.4  | 0.1  | -0.4  | 0.0   | -0.3 | -0.4 | -0.3 | 0.4  | 0.5  | 0.2  | 0.1  | 0.2  | 0.0  | 0.3  | 1    |      |     |       |       |         |      |            |        |  |  |  |  |
| SO2        | 0.0   | 0.1  | 0.0  | -0.2 | 0.0   | 0.1  | -0.1   | -0.2   | -0.1 | 0.0  | -0.1 | 0.1  | 0.3  | 0.1  | 0.3  | 0.0   | 0.2   | -0.1 | 0.0  | -0.1 | -0.1 | 0.1  | 0.4  | 0.0  | -0.1 | 0.0  | 0.6  | 0.6  | 1    |     |       |       |         |      |            |        |  |  |  |  |
| NO2        | 0.1   | 0.3  | 0.2  | -0.1 | 0.4   | 0.0  | 0.2    | 0.1    | -0.2 | 0.1  | -0.4 | 0.0  | 0.0  | 0.5  | 0.1  | 0.3   | 0.1   | 0.0  | 0.1  | 0.1  | 0.0  | 0.5  | 0.2  | 0.1  | 0.3  | 0.5  | 0.6  | 0.6  | 1    |     |       |       |         |      |            |        |  |  |  |  |
| conoc      | 0.5   | 0.4  | 0.3  | 0.5  | 0.0   | -0.5 | 0.4    | 0.7    | -0.4 | 0.7  | 0.1  | 0.7  | 0.4  | -0.5 | 0.3  | 0.6   | 0.1   | 0.3  | 0.4  | 0.6  | -0.4 | -0.5 | 0.1  | 0.2  | -0.2 | 0.3  | -0.1 | -0.7 | -0.2 | 1   |       |       |         |      |            |        |  |  |  |  |
| PM2.5      | -0.3  | -0.1 | -0.1 | -0.1 | 0.4   | 0.2  | 0.1    | 0.0    | 0.0  | 0.0  | 0.1  | -0.2 | 0.1  | 0.3  | 0.5  | -0.1  | 0.2   | -0.1 | -0.3 | 0.1  | 0.3  | 0.3  | 0.2  | 0.4  | 0.0  | 0.4  | 0.6  | 0.7  | 0.7  | 1   |       |       |         |      |            |        |  |  |  |  |
| Humedad    | -0.3  | -0.3 | 0.0  | -0.2 | 0.3   | 0.0  | -0.2   | -0.5   | 0.2  | -0.4 | -0.3 | -0.4 | -0.4 | 0.0  | -0.1 | -0.2  | -0.1  | 0.1  | -0.2 | -0.2 | 0.0  | -0.1 | -0.1 | 0.3  | 0.0  | 0.2  | -0.1 | 0.2  | -0.1 | 1   |       |       |         |      |            |        |  |  |  |  |
| Temp       | -0.1  | -0.1 | 0.0  | 0.1  | -0.2  | 0.1  | -0.1   | 0.0    | -0.2 | 0.0  | 0.1  | 0.0  | -0.2 | 0.0  | -0.1 | 0.0   | 0.1   | 0.0  | 0.1  | 0.0  | 0.1  | 0.2  | -0.1 | -0.1 | -0.2 | -0.1 | -0.2 | 0.2  | 0.0  | 1   |       |       |         |      |            |        |  |  |  |  |
| Vel Viento | 0.3   | -0.2 | -0.1 | 0.6  | 0.3   | -0.2 | 0.7    | 0.0    | -0.3 | -0.3 | 0.6  | 0.2  | 0.6  | 0.2  | -0.3 | 0.6   | 0.5   | -0.1 | -0.1 | 0.1  | 0.7  | 0.1  | -0.2 | 0.0  | 0.8  | 0.2  | -0.3 | -0.1 | -0.1 | 1   |       |       |         |      |            |        |  |  |  |  |
| Precip     | 0.1   | 0.0  | 0.3  | 0.0  | -0.1  | -0.3 | 0.1    | -0.3   | 0.1  | 0.0  | -0.4 | 0.0  | -0.3 | -0.3 | 0.0  | 0.2   | 0.1   | 0.2  | 0.1  | -0.3 | -0.3 | 0.1  | -0.2 | 0.3  | 0.0  | -0.1 | 0.1  | -0.2 | 0.2  | 0.0 | -0.1  | 1     |         |      |            |        |  |  |  |  |

 r > 0.80

 r > 0.5

La Tabla 4 nos muestra los coeficientes de correlación entre los datos de meteorología y contaminantes críticos ( $CO$ ,  $NO_x$ ,  $SO_2$ ,  $O_3$  y  $PM_{2.5}$ ) registrados en la estación REMMAQ de Belisario y metales medidos en la zona de estudio.

Acorde con las correlaciones altas es decir  $r > 0.80$  entre positivas y negativas están Cu y Al con ( $r= 0.86$ ), Cu y Te con ( $r= 0.85$ ), K y Mg con ( $r= 0.88$ ), K y Si con ( $r= 0.92$ ), Al y Li con ( $r= -0.86$ ), Al y Te con ( $r=0.87$ ), Li y Te con ( $r= -0.86$ ), V y Te con ( $r= 0.85$ ), S y Si con ( $r= 0.91$ ). Entre la mayor parte de metales están los de fuentes naturales seguidos de los de fuentes de tráfico esto nos indica una alta relación entre estos metales que seguramente provienen de otros lugares de la ciudad siendo transportado por los vientos. Las correlaciones más altas son V con Si y S los tres elementos provienen de diferentes fuentes como tráfico, industria y natural lo que indica un valor alto de asociación de las variables que van aumentando constantemente dependiendo una de la otra. Se estima que los vientos movilizan este tipo de elementos como se mostrará posteriormente en flujos de aire.

La alta correlación entre  $PM_{2.5}$  con  $NO_2$  y  $CO$  en Belisario se debe a la contribución de la contaminación por vehículos motorizados e implica que las emisiones de estos contaminantes gaseosos aumentan de la misma manera que las emisiones por partículas finas (Zalakeviciute et al. 2019).

También existe correlaciones moderadas con valores entre  $r= 0.5$  a  $0.8$ , los datos de meteorología de la estación Belisario. Se observa una correlación positiva de nivel moderado entre la temperatura y velocidad del viento ( $r=0.67$ ) este comportamiento puede influir en el aumento de gradiente térmico debido al aumento de la elevación solar, lo que causa incremento en la velocidad del viento.

En un estudio anteriormente realizado en Quito de precipitación, de valor superior a 9 mm, que se identificó como un umbral para un evento de lluvia fuerte útil para diferenciar la concentración de material particulado fino (Zalakeviciute, R., López-Villada, J., & Rybarczyk, Y, 2018). Como ejemplo, durante los días de lluvia ligera a moderada (1–8 mm), la humedad relativa (HR) promedio es del 76% y las

concentraciones de  $PM_{2.5}$  promedio son más altas a  $18.9 \mu g/m^3$ , mientras que en los días de lluvias más fuertes ( $> 9 \text{ mm}$ ), el promedio de HR es del 83% y las concentraciones de  $PM_{2.5}$  fueron más bajas de  $17.7 \mu g/m^3$ , observando que las concentraciones promedio diarias de  $PM_{2.5}$  disminuyen notablemente con una HR más alta, demostrando un efecto de limpieza de la precipitación.

#### 4.6 Resultados de metales por ICP-OES

Tabla 5.

*Resultados ICP en concentración de metales pesados en mg/L para todas las muestras.*

| MUESTRA       | mm    | Metales mg/L |       |       |       |       |       |        |       |       |       |       |       |        |       |       |        |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|---------------|-------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|               |       | B            | Ba    | Bi    | Co    | Cr    | Cu    | K      | Mn    | Ni    | Ph    | S     | Zn    | Cd     | Fe    | Al    | Mg     | Li    | Ag    | Ga    | In    | Mn    | Y     | Ta    | Sr    | S     | P     | Si    |
| 9 Mayo        | 0.65  | ND           | 0.081 | ND    | ND    | 0.007 | 0.022 | 0.707  | 0.026 | 0.001 | ND    | 0.023 | 0.040 | 5.200  | 0.255 | 1.900 | 4.408  | 0.003 | ND    | 0.002 | 0.825 | 0.005 | 0.121 | 0.021 | 1.002 | 0.145 | 0.655 | 0.000 |
| 10 Mayo       | 2.88  | ND           | 0.083 | ND    | ND    | 0.003 | 0.014 | 0.333  | 0.017 | ND    | ND    | 0.017 | 0.008 | 3.869  | 0.039 | 1.513 | 3.934  | 0.002 | ND    | ND    | 0.725 | 0.003 | 0.056 | ND    | 0.534 | 0.621 | 0.000 |       |
| 11 Mayo       | 0.69  | ND           | 0.099 | ND    | ND    | 0.004 | 0.017 | 0.380  | 0.022 | ND    | 0.002 | 0.021 | 0.012 | 4.221  | 0.067 | 1.830 | 4.065  | ND    | ND    | 0.001 | 0.884 | 0.003 | 0.145 | 0.005 | 0.457 | 0.645 | 0.02  |       |
| 13 Mayo       | 4.15  | ND           | 0.070 | ND    | ND    | 0.001 | 0.013 | 0.219  | 0.017 | ND    | 0.001 | 0.015 | 0.013 | 3.383  | 0.030 | 1.687 | 3.403  | 0.003 | ND    | ND    | 0.693 | 0.002 | 0.139 | ND    | 0.340 | 0.024 | 0.140 |       |
| 14 Mayo       | 1.05  | 0.003        | 0.081 | ND    | ND    | 0.003 | 0.025 | 0.682  | 0.017 | 0.003 | 0.001 | 0.018 | 0.036 | 4.119  | 0.022 | 1.473 | 4.443  | 0.002 | 0.006 | ND    | 0.001 | 0.742 | 0.002 | 0.111 | 0.004 | 0.763 | 0.066 |       |
| 19 Mayo       | 10.37 | ND           | 0.069 | ND    | ND    | 0.002 | 0.014 | 0.267  | 0.016 | ND    | 0.003 | 0.015 | 0.013 | 3.465  | 0.031 | 1.680 | 3.357  | 0.001 | ND    | ND    | 0.003 | 0.884 | 0.002 | 0.059 | 0.005 | 0.302 | 0.070 |       |
| 26 Mayo       | 3     | 0.076        | 0.073 | 0.010 | 0.002 | ND    | ND    | 2.457  | 0.022 | 0.075 | ND    | 0.046 | 0.001 | 6.331  | 0.055 | 0.083 | 17.942 | 0.050 | 0.001 | ND    | 0.001 | 1.701 | ND    | ND    | 0.383 | 0.139 | 0.203 |       |
| 11 Junio      | 4.84  | ND           | 0.094 | ND    | ND    | 0.001 | 0.017 | 0.303  | 0.014 | ND    | 0.006 | 0.021 | 0.009 | 4.961  | 0.042 | 1.937 | 4.220  | ND    | ND    | ND    | 0.001 | 0.831 | 0.002 | 0.065 | 0.003 | 0.539 | 0.233 |       |
| 19 Septiembre | 18.44 | 0.097        | 0.036 | 0.005 | 0.003 | 0.016 | ND    | 10.698 | 0.001 | 0.066 | ND    | 0.090 | 0.016 | 11.651 | ND    | 0.254 | 91.324 | 0.074 | ND    | ND    | 0.010 | 4.088 | 0.003 | 0.037 | ND    | 3.138 | 0.188 |       |
| 23 Septiembre | 2.07  | 0.151        | 0.578 | 0.009 | 0.001 | 0.065 | ND    | 4.384  | 0.042 | 0.066 | ND    | 0.070 | 0.014 | 11.145 | 0.274 | 0.822 | 34.912 | 0.623 | 0.018 | ND    | 0.055 | 2.209 | ND    | 0.028 | ND    | 1.077 | 0.010 |       |
| 24 Septiembre | 25.56 | 0.029        | 0.402 | 0.009 | 0.001 | ND    | 0.005 | 2.869  | 0.029 | 0.072 | ND    | 0.040 | 0.000 | 9.016  | 0.107 | 0.584 | 22.144 | 0.022 | 0.022 | 0.633 | 0.015 | 1.448 | ND    | 0.004 | 0.028 | 0.088 | 0.149 |       |
| 29 Septiembre | 13.83 | 0.105        | 0.324 | 0.012 | 0.001 | 0.001 | 0.111 | 2.485  | 0.025 | 0.078 | ND    | 0.047 | 0.006 | 12.881 | 0.187 | 0.536 | 16.937 | 0.077 | ND    | ND    | 0.029 | 0.023 | 1.729 | ND    | ND    | 0.435 | 0.026 |       |
| 7 Octubre     | 6.92  | 0.065        | 0.063 | 0.009 | 0.001 | ND    | ND    | 1.548  | 0.028 | 0.079 | ND    | 0.042 | 0.000 | 8.044  | 0.110 | 0.215 | 10.788 | 0.058 | ND    | ND    | 0.019 | 2.037 | ND    | 0.012 | 0.043 | ND    | 0.055 |       |
| 13 Octubre    | 4.03  | 0.042        | 0.441 | 0.001 | 0.002 | 0.001 | ND    | 2.175  | 0.056 | 0.070 | ND    | 0.066 | 0.074 | 10.249 | 0.449 | 0.678 | 10.989 | 0.023 | 0.003 | 0.028 | 0.027 | 2.142 | ND    | 0.010 | ND    | 0.845 | ND    |       |
| 17 Octubre    | 13.83 | 0.048        | 0.515 | 0.020 | 0.001 | 0.001 | ND    | 1.461  | 0.033 | 0.061 | ND    | 0.051 | 0.011 | 7.351  | 0.259 | 0.747 | 11.599 | 0.037 | 0.061 | 0.067 | 0.029 | 1.693 | ND    | 0.010 | 0.003 | 0.310 | ND    |       |
| 19 Octubre    | 5.76  | 0.117        | 0.488 | 0.012 | ND    | 0.016 | ND    | 1.789  | 0.029 | 0.069 | ND    | 0.048 | 0.000 | 6.863  | 0.118 | 0.543 | 12.893 | 0.059 | 0.003 | 0.183 | 0.021 | 1.631 | ND    | ND    | 0.014 | 0.465 | 0.019 |       |
| 22 Octubre    | 18.44 | 0.118        | 0.448 | ND    | ND    | ND    | ND    | 1.587  | 0.026 | 0.052 | ND    | 0.051 | 0.000 | 7.582  | 0.310 | 0.201 | 11.073 | 0.082 | ND    | ND    | 0.032 | 2.025 | ND    | 0.025 | ND    | ND    | 0.200 |       |
| 23 Octubre    | 6.92  | 0.048        | 0.317 | 0.009 | 0.001 | ND    | ND    | 1.366  | 0.033 | 0.072 | ND    | 0.046 | 0.000 | 11.945 | 0.066 | 0.447 | 10.974 | 0.066 | ND    | ND    | 0.025 | 1.940 | ND    | 0.017 | 0.730 | ND    | 0.260 |       |
| 24 Octubre    | 4.03  | 0.058        | 0.650 | 0.005 | 0.001 | 0.011 | ND    | 1.801  | 0.039 | 0.135 | ND    | 0.064 | 0.011 | 10.880 | 0.584 | 0.880 | 78.592 | 0.068 | 0.008 | ND    | 0.022 | 2.247 | ND    | ND    | 0.028 | 0.775 | ND    |       |
| 1 Noviembre   | 8.07  | 0.029        | 0.377 | 0.015 | 0.001 | 0.003 | ND    | 1.722  | 0.025 | 0.073 | ND    | 0.043 | 0.000 | 6.470  | 0.032 | 0.473 | 10.350 | 0.061 | ND    | ND    | 0.055 | 0.024 | 1.484 | ND    | ND    | 0.426 | ND    |       |
| 6 Noviembre   | 10.37 | 0.013        | 0.064 | 0.011 | 0.001 | 0.001 | ND    | 1.278  | 0.020 | 0.075 | ND    | 0.041 | 0.000 | 6.611  | 0.043 | 0.083 | 7.984  | 0.075 | ND    | ND    | 0.023 | 1.639 | ND    | 0.019 | 0.012 | ND    | 0.245 |       |
| 10 Noviembre  | 10.49 | 0.039        | 0.072 | 0.012 | 0.001 | 0.008 | ND    | 1.069  | 0.023 | 0.079 | ND    | 0.041 | 0.000 | 10.491 | 0.048 | 0.067 | 7.660  | 0.054 | 0.008 | 0.110 | 0.014 | 1.666 | ND    | 0.003 | ND    | 0.169 | ND    |       |
| 11 Noviembre  | 13.26 | 0.050        | 0.315 | 0.014 | ND    | 0.007 | ND    | 1.262  | 0.024 | 0.081 | ND    | 0.039 | 0.000 | 5.482  | 0.065 | 0.442 | 9.944  | 0.067 | ND    | ND    | 0.100 | 0.040 | 1.409 | ND    | 0.017 | 0.669 | ND    |       |
| 12 Noviembre  | 10.49 | 0.032        | 0.198 | 0.013 | 0.001 | 0.009 | ND    | 1.002  | 0.019 | 0.059 | ND    | 0.028 | 0.000 | 6.626  | 0.033 | 0.356 | 7.611  | 0.042 | 0.025 | ND    | 0.020 | 1.388 | ND    | 0.008 | ND    | 0.029 | 0.266 |       |
| 13 Noviembre  | 18.44 | 0.041        | 0.141 | 0.016 | 0.001 | 0.002 | ND    | 2.012  | 0.008 | 0.078 | ND    | 0.030 | ND    | 7.023  | 0.019 | 0.298 | 7.739  | 0.039 | 0.022 | ND    | 0.009 | 1.319 | ND    | 0.010 | ND    | 0.094 | 0.290 |       |

En la Tabla 5 se presentan todos los metales analizados en el equipo ICP de laboratorio. En total son 28 metales analizados en 25 muestras de lluvia en los dos trimestres teniendo mayor cantidad de muestras en el segundo trimestre debido a que la época invernal va desde octubre a mayo (DMQ 2008) a diferencia de la época seca desde junio a septiembre con lluvias esporádicas. Los resultados de las muestras fueron obtenidos en mg/L.

Tabla 6.

*Metales encontrados en zona Floresta por medio de análisis ICP-OES.*

| Fecha         | Metales |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    | Total |    |
|---------------|---------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-------|----|
|               | B       | Ba | Bi | Co | Cr | Cu | K  | Mn | Ni | Pb | Sr | Zn | Ca | Fe | Al | Na | Li | Ag | Ga | In | Mg | V  | Te | Se | S  | P  | Si | As |       |    |
| 9 Mayo        |         | Ba |    |    | Cr | Cu | K  | Mn | Ni |    | Sr | Zn | Ca | Fe | Al | Na | Li |    |    |    | In | Mg | V  | Te | Se | S  | P  | Si | 21    |    |
| 10 Mayo       |         | Ba |    |    | Cr | Cu | K  | Mn |    |    | Sr | Zn | Ca | Fe | Al | Na | Li |    |    |    |    | Mg | V  | Te |    | S  | P  | Si | 18    |    |
| 11 Mayo       |         | Ba |    |    | Cr | Cu | K  | Mn |    | Pb | Sr | Zn | Ca | Fe | Al | Na | Li |    |    |    | In | Mg | V  | Te | Se | S  | P  | Si | 20    |    |
| 13 Mayo       |         | Ba |    |    | Cr | Cu | K  | Mn |    | Pb | Sr | Zn | Ca | Fe | Al | Na | Li |    |    |    |    | Mg | V  | Te |    | S  | P  | Si | 19    |    |
| 14 Mayo       | B       | Ba |    |    | Cr | Cu | K  | Mn | Ni | Pb | Sr | Zn | Ca | Fe | Al | Na | Li | Ag |    |    | In | Mg | V  | Te | Se | S  | P  | Si | 24    |    |
| 19 Mayo       |         | Ba |    |    | Cr | Cu | K  | Mn |    | Pb | Sr | Zn | Ca | Fe | Al | Na | Li |    |    |    | In | Mg | V  | Te | Se | S  | P  | Si | 21    |    |
| 26 Mayo       | B       | Ba | Bi | Co |    |    | K  | Mn | Ni |    | Sr | Zn | Ca | Fe | Al | Na | Li | Ag |    |    | In | Mg | V  | Te | Se | S  | P  | Si | 20    |    |
| 11 Junio      |         | Ba |    |    | Cr | Cu | K  | Mn |    | Pb | Sr | Zn | Ca | Fe | Al | Na | Li |    |    |    | In | Mg | V  | Te | Se | S  | P  | Si | 20    |    |
| 19 Septiembre | B       | Ba | Bi | Co | Cr |    | K  | Mn | Ni |    | Sr | Zn | Ca | Fe | Al | Na | Li |    |    |    | In | Mg | V  | Te |    | S  | P  | Si | As    | 22 |
| 23 Septiembre | B       | Ba | Bi | Co | Cr |    | K  | Mn | Ni |    | Sr | Zn | Ca | Fe | Al | Na | Li | Ag |    |    | In | Mg | V  | Te |    | S  | P  | Si | As    | 23 |
| 24 Septiembre | B       | Ba | Bi | Co |    |    | Cu | K  | Mn | Ni |    | Sr |    | Ca | Fe | Al | Na | Li | Ag | Ga | In | Mg | Te | Se | S  | P  | Si | As | 24    |    |
| 29 Septiembre | B       | Ba | Bi | Co | Cr | Cu | K  | Mn | Ni |    | Sr | Zn | Ca | Fe | Al | Na | Li |    | Ga | In | Mg |    | Te | Se | S  | P  | Si | As | 22    |    |
| 7 Octubre     | B       | Ba | Bi | Co |    |    | K  | Mn | Ni |    | Sr |    | Ca | Fe | Al | Na | Li |    |    |    | In | Mg | Te | Se |    | S  | P  | Si | 19    |    |
| 13 Octubre    | B       | Ba | Bi | Co | Cr |    | K  | Mn | Ni |    | Sr | Zn | Ca | Fe | Al | Na | Li | Ag | Ga | In | Mg | Te |    | Se | S  |    | Si | As | 22    |    |
| 17 Octubre    | B       | Ba | Bi | Co | Cr |    | K  | Mn | Ni |    | Sr | Zn | Ca | Fe | Al | Na | Li | Ag | Ga | In | Mg | Te | Se | S  |    | Si | As | 23 |       |    |
| 19 Octubre    | B       | Ba | Bi |    | Cr |    | K  | Mn | Ni |    | Sr |    | Ca | Fe | Al | Na | Li | Ag | Ga | In | Mg |    | Te | Se | S  | P  | Si | As | 21    |    |
| 22 Octubre    | B       | Ba |    |    |    |    | K  | Mn | Ni |    | Sr |    | Ca | Fe | Al | Na | Li |    |    |    | In | Mg | Te |    | Se | S  | P  | Si | As    | 15 |
| 23 Octubre    | B       | Ba | Bi | Co |    |    | K  | Mn | Ni |    | Sr |    | Ca | Fe | Al | Na | Li |    |    |    | In | Mg |    | Te | Se | S  |    | Si | As    | 18 |
| 24 Octubre    | B       | Ba | Bi | Co | Cr |    | K  | Mn | Ni |    | Sr | Zn | Ca | Fe | Al | Na | Li | Ag |    |    | In | Mg | Te | Se | S  |    | Si | As | 22    |    |
| 1 Noviembre   | B       | Ba | Bi | Co | Cr |    | K  | Mn | Ni |    | Sr |    | Ca | Fe | Al | Na | Li |    | Ga | In | Mg | Te | Se | S  |    | Si | As | 21 |       |    |
| 6 Noviembre   | B       | Ba | Bi | Co | Cr |    | K  | Mn | Ni |    | Sr |    | Ca | Fe | Al | Na | Li |    |    |    | In | Mg | Te | Se |    | S  | P  | Si | As    | 19 |
| 10 Noviembre  | B       | Ba | Bi | Co | Cr |    | K  | Mn | Ni |    | Sr |    | Ca | Fe | Al | Na | Li | Ag | Ga | In | Mg |    | Te | Se | S  |    | Si | As | 21    |    |
| 11 Noviembre  | B       | Ba | Bi |    | Cr |    | K  | Mn | Ni |    | Sr |    | Ca | Fe | Al | Na | Li |    | Ga | In | Mg |    | Te | Se | S  |    | Si | As | 19    |    |
| 12 Noviembre  | B       | Ba | Bi | Co | Cr |    | K  | Mn | Ni |    | Sr |    | Ca | Fe | Al | Na | Li | Ag |    |    | In | Mg | Te | Se | S  | P  | Si | As | 22    |    |
| 13 Noviembre  | B       | Ba | Bi | Co | Cr |    | K  | Mn | Ni |    | Sr |    | Ca | Fe | Al | Na | Li | Ag |    |    | In | Mg | Te | Se | S  | P  | Si | As | 22    |    |

La Tabla 6 muestra la cantidad de metales presentes por las 25 muestras analizadas. De la misma manera se obtuvo un rango de presencia desde 18 a 22 metales por día. Con la excepción del 22 de octubre de 2019 con 15 metales por día y las fechas de 14 de mayo además de 24 de septiembre de 2019 con un valor de 24 metales por día en la muestras seguramente influenciado por la velocidad y dirección del viento de esos días.

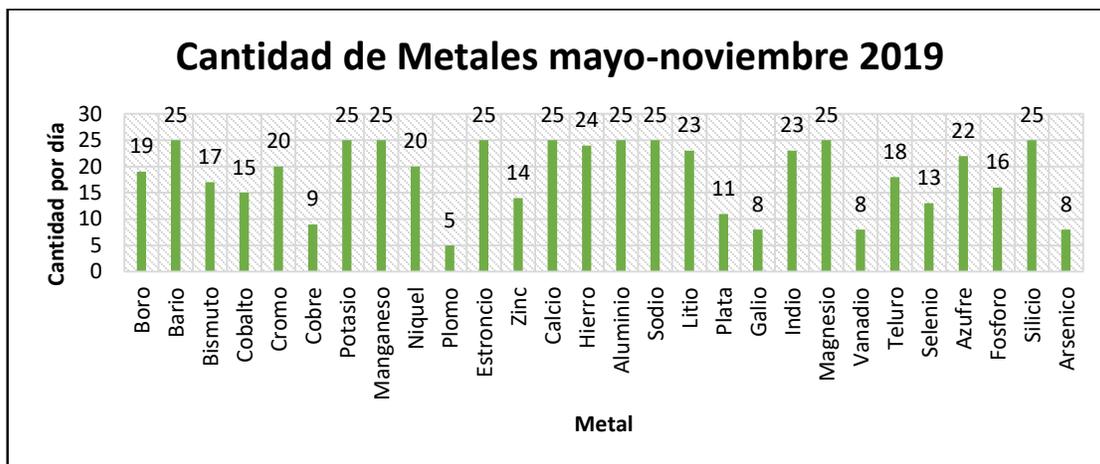
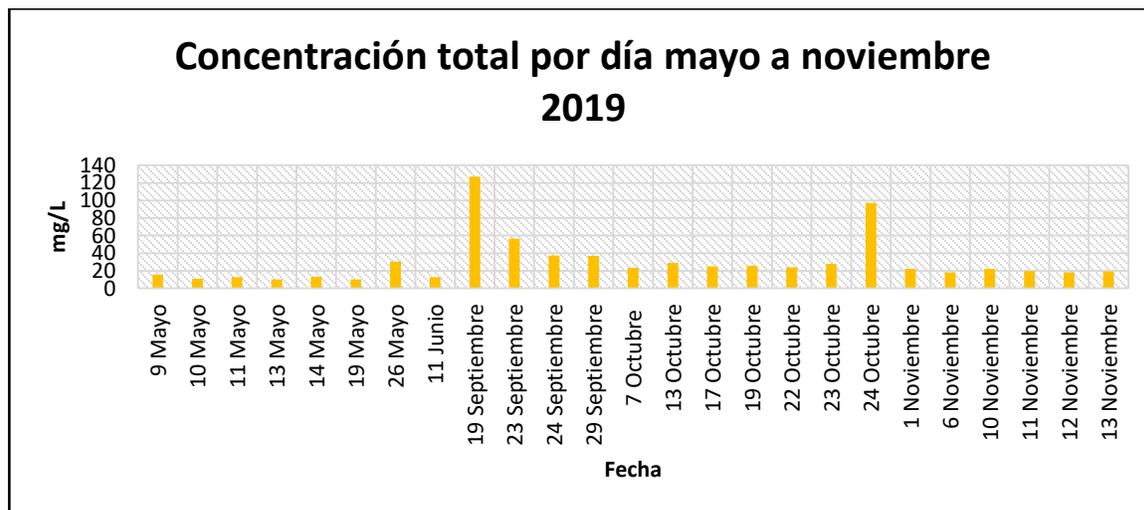


Figura 27. Cantidad de cada metal por separado con las muestras analizadas en ICP.

En la Figura 27 se presenta la cantidad de metales por día en todo el tiempo de estudio. De esta manera tenemos las veces que hubo la presencia de cada metal por cada muestra, siendo los más persistentes (Ba, K, Mn, Sr, Ca, Al, Na, Mg y Si) en todos las 25 fechas de muestreo, puesto a que sus fuentes provienen de tráfico vehicular, quema o incendio y de origen natural. Por el contrario, la más baja identificación fue Pb en 4 muestras, debido a que el plomo proviene de fuentes industriales (minera, metalurgia, cosméticos, vidrio) y la zona de muestreo es residencial.



*Figura 28.* Suma de toda la concentración de metales por cada día de muestra.

En la Figura 28 se muestra la sumatoria de concentración total de metales por cada día de las 25 muestras de estudio desde mayo a noviembre 2019. Se observa que el 19 de septiembre de 2019 fue el día con mayor concentración de metales con un valor de 127,105 mg/L, seguido del 24 de octubre con 97,14 mg/L y el 23 de septiembre con un valor de 56,54 mg/L.

A diferencia del 19 de septiembre las mayores concentraciones de metales se presentan en muestras en las cuales el nivel de precipitación está por debajo de los 7 mm/día esto nos indica que hay una tendencia inversa es decir que a menor categoría de precipitación existe mayor concentración y viceversa.

Según el artículo de (Lamprea and Ruban 2011) durante los eventos de lluvia, los contaminantes de distintos entornos urbanos se lavan de la superficie y caen a la atmósfera.

Además, el proceso de eliminación de la lluvia se ve afectado por muchos factores, incluida la distribución e intensidad del tamaño de las gotas de lluvia, la distribución y concentración del tamaño de las partículas entre otras características, inclusive se ha encontrado que la deposición húmeda puede reducir la contaminación del aire al eliminar PM y otros tipos de contaminantes y la eficacia de esta remoción está relacionada con la duración e intensidad del evento de precipitación. En un estudio previo se demostró que en comparación con la deposición seca, la deposición húmeda fue más eficiente en términos de eliminación de  $PM_{2.5}$  (Wu et al. 2018).

En el caso del 19 de septiembre la categoría de precipitación fue fuerte con un valor de 18.44 mm/día en Floresta y se encontró la concentración más alta de metales, esto se debe a que fue el primer evento de precipitación en la zona después de la época seca de verano junio - agosto por lo que la lluvia hizo un barrido de las sustancias acumuladas en la atmósfera.

## 4.7 Clasificación de metales por su fuente

### 4.7.1 Información general

Las partículas pueden venir de diferentes fuentes por eso dividimos en categorías. Se tiene cuatro categorías de fuentes principales acerca de la concentración de metales acumulados en la precipitación los cuales son: tráfico, industria, fuentes naturales incluido el polvo del suelo, incendios o quema. Las categorías se fundamentaron en base a un estudio de revisión de literatura (Karagulian et al. 2015) para la distribución de fuentes de contaminación del aire acorde a los perfiles químicos de cada metal.

### 4.7.2 Metales de fuente de tráfico

En esta categoría de fuente de tráfico, las áreas con mayor cantidad de tráfico vehicular se ven relacionadas por investigaciones posteriores con una alta concentración de metales como: Cd, Cu, Zn, Pb y Pt. En las carreteras y estacionamientos el nivel de metales está relacionado directamente por lubricantes y la combustión e inclusive por el desgaste de frenos y llantas razón por la cual los beneficiarios de las vías y personas que viven en zonas con alto tráfico vehicular están expuestos a elementos metálicos (Mejía, Pinzón, and González 2013).

Tabla 7.

*Metales encontrados de fuente por tráfico.*

| <b>Metales por tráfico</b> | <b>Nomenclatura</b> |
|----------------------------|---------------------|
| <b>Azufre</b>              | <b>S</b>            |
| <b>Bario</b>               | <b>Ba</b>           |
| <b>Cromo</b>               | <b>Cr</b>           |
| <b>Estroncio</b>           | <b>Sr</b>           |
| <b>Zinc</b>                | <b>Zn</b>           |
| <b>Boro</b>                | <b>B</b>            |

#### 4.7.2.1 Metales de fuente por tráfico con correlación negativa con precipitación

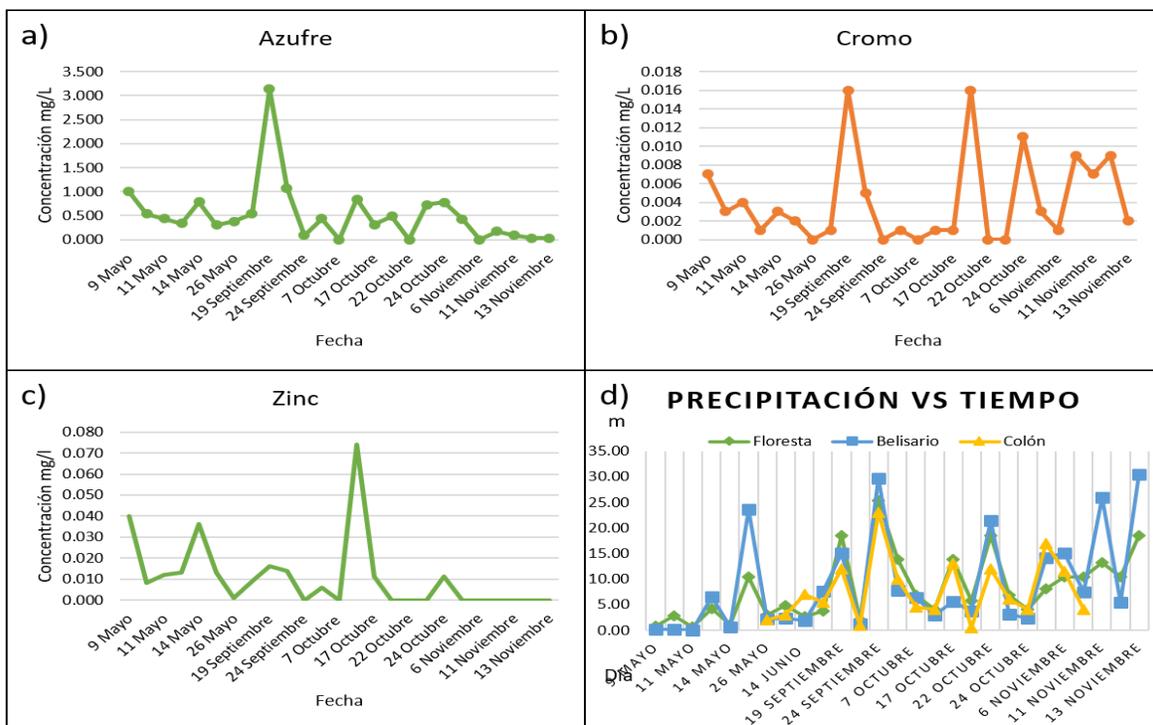


Figura 29. Metales de fuentes de tráfico con una correlación negativa

a): Concentración de Azufre en todo el estudio.

b): Concentración de Cromo en todo el estudio.

c): Concentración de Zinc en todo el estudio.

d): Precipitación total en tres estaciones.

En la Figura 29 se muestra los metales que tuvieron una tendencia negativa, es decir que una variable va disminuyendo y la otra aumenta como lo es el caso de la precipitación y concentración de metales, los valores fueron azufre ( $r=-0.04$ ), cromo ( $r=-0.05$ ) y zinc ( $r=-0.4$ ) además se puede observar la variación en intensidad de lluvia en las tres estaciones de estudio.

Los resultados obtenidos manifiestan picos en concentraciones (mg/L) así el azufre es proporcional en la mayor parte del tiempo a diferencia del pico de 19 de

septiembre con un valor de 3.13 mg/L y con 18.44 mm/día de lluvia. Cromo tiene variaciones en algunas fechas, siendo sus picos más altos son el 19 de septiembre y 17 de octubre de 2019 con un valor de 0.016 mg/L y con 5.76 mm/día y 0.016 mg/L con 18.44 mm/día respectivamente. Zinc tiene variaciones en algunas fechas, siendo el pico más alto el 13 de octubre de 2019 con un valor de 0.074 mg/L y con 4.03 mm/día.



Figura 30. Trayectoria de flujo de viento hacia atrás en el tiempo del 19 de septiembre de 2019.

Adaptado de Modelo Hysplit NOAA y Google Earth.

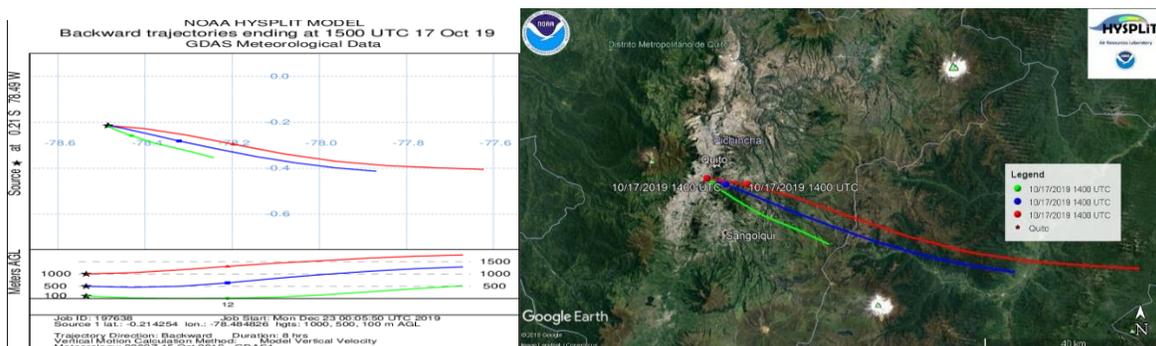


Figura 31. Trayectoria de flujo de viento hacia atrás en el tiempo del 17 de octubre de 2019.

Adaptado de Modelo Hysplit NOAA y Google Earth.

Estos valores fueron relacionados con el flujo de masa de aire, como se muestra en las Figuras 30 y 31 siendo el 19 de septiembre y el 17 de octubre de 2019 los días con los picos más altos en concentración de los metales ya mencionados. El viento proviene en las 3 alturas en dirección sureste (SE). Esto puede significar que las masas del aire medidos en la Floresta provienen de la Valle de Los Chillos y sur de la ciudad (una de las zonas con más alto nivel de PM<sub>2.5</sub>), trayendo en su camino contaminación por S, Zn y Cr.

#### 4.7.2.2 Metales de fuente por tráfico con correlación positiva con la precipitación

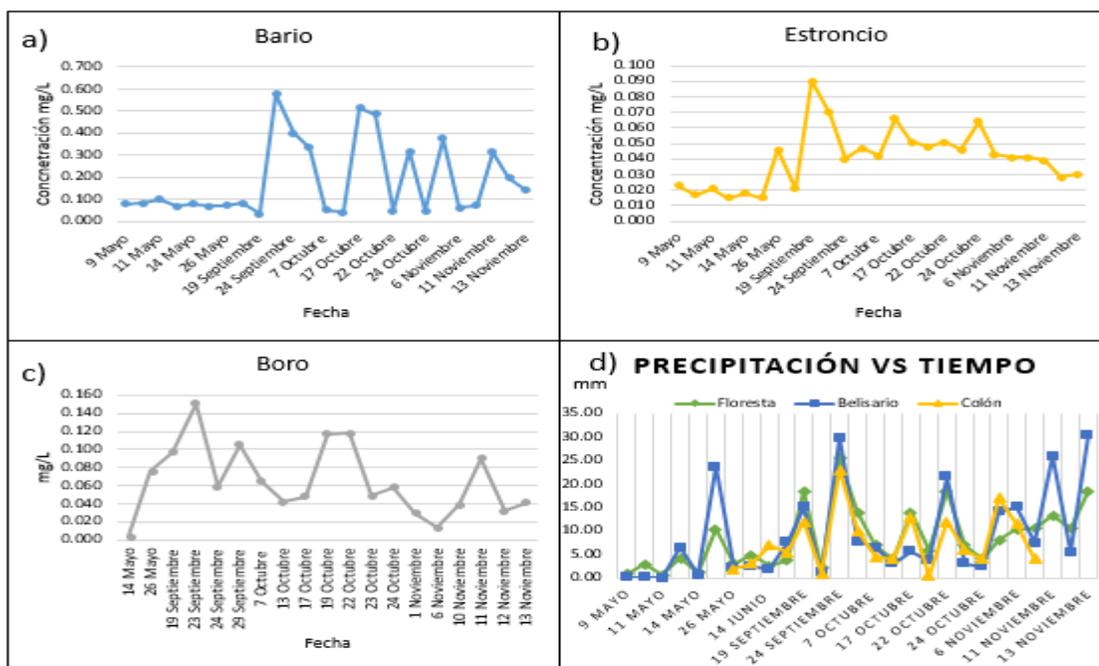


Figura 32. Metales de fuentes de tráfico con una correlación positiva

- a): Concentración de Bario en todo el estudio.
- b): Concentración de Estroncio en todo el estudio.
- c): Concentración de Boro en todo el estudio.
- d): Precipitación total en tres estaciones.

Al contrario, la Figura 32 en la cual nos enseña los metales que tuvieron una tendencia positiva, porque ambas variables van aumentando como lo es el caso de la precipitación y concentración de metales, los valores fueron bario ( $r=0.17$ ), estroncio ( $r=0.24$ ) y boro ( $r=0.31$ ) también se puede observar la variación en intensidad de lluvia en las tres estaciones de estudio.

Los resultados obtenidos manifiestan picos en concentraciones (mg/L) son: bario tiene variaciones en algunas fechas, siendo su pico más alto el 23 de septiembre de 2019 con un valor de 0.578 mg/L y con 2.07 mm/día de lluvia, estroncio tiene su pico más alto el 19 de septiembre de 2019 con un valor de 0.09 mg/L y con 18.44 mm/día y boro tiene el pico más alto el 23 de octubre de 2019 con un valor de 0.151 mg/L y con 2.07 mm/día.

Mientras los resultados de Ba y Sr son muy parecidas a los S, Zn y Cr, B tiene diferente comportamiento temporal, sugiriendo otro tipo de fuente, posiblemente industrial. Esto es comúnmente el caso de diferentes metales representando varios fuentes de emisión (Karagulian, 2015). Según el artículo de (Reyes et al. 2016) los metales que mayor incidencia tienen en la atmósfera son: Pb, Ni, Cd, Fe, Hg, Cu, Cr, Mn y As. De igual manera que los anteriores metales el boro está ligado a las industrias y al tráfico.

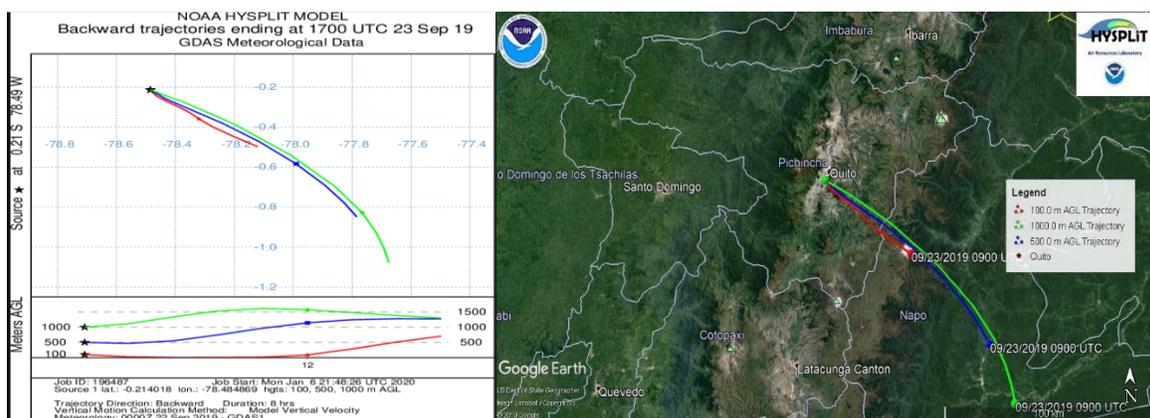


Figura 33. Trayectoria de flujo de viento hacia atrás en el tiempo del 23 de septiembre de 2019.

Adaptado de Modelo Hysplit NOAA y Google Earth.

Estos valores fueron relacionados con el flujo de masa de aire, como se observa en la Figura 33 siendo el 23 de septiembre de 2019 el día con los picos más altos en concentración de los metales ya mencionados. El viento proviene en las 3 alturas en dirección sureste (SE) es decir viene de los Valles, sur de la ciudad y originándose de la amazonia.

Acorde con el Libro VI Anexo 1 Norma de Calidad Ambiental: Recurso Agua en la Tabla 2, ninguno de los metales por fuente de tráfico supera la dosis mínima para consumo en personas por lo que no afecta a la salud.

#### 4.7.3 Metales de fuentes industriales

Fuentes de actividades industriales es una categoría heterogénea que incluye principalmente emisiones de la combustión de petróleo, quema de carbón en plantas de energía y emisiones de diferentes tipos de industrias (petroquímica, metalúrgica, cerámica, farmacéutica, hardware de TI, entre otros.) y de actividades relacionadas con los puertos. Las fuentes industriales a veces se mezclan con fuentes de combustión no identificadas o tráfico (Karagulian et al. 2015).

Los metales relacionados a las actividades industriales que fueron analizados en laboratorio son: Cu, Mn, Ni, Pb, V.

Tabla 8.

*Metales por fuentes industriales.*

| Metales por Industria | Nomenclatura |
|-----------------------|--------------|
| Cobre                 | Cu           |
| Manganeso             | Mn           |
| Níquel                | Ni           |
| Plomo                 | Pb           |
| Vanadio               | V            |
| Arsénico              | As           |

#### 4.7.3.1 Metales de fuentes industriales con correlación negativa con la precipitación

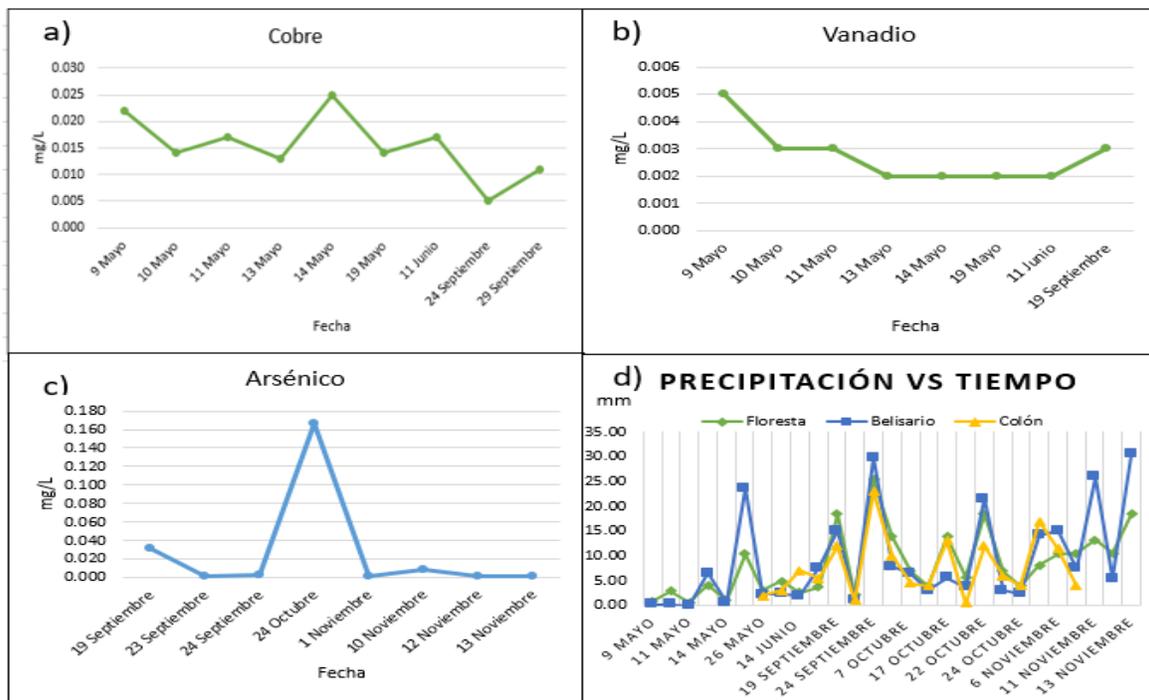


Figura 34. Metales de fuentes de industria con una correlación negativa.

- a): Concentración de Cobres en todo el estudio.
- b): Concentración de Vanadio en todo el estudio.
- c): Concentración de Arsénico en todo el estudio.
- d): Precipitación total en tres estaciones.

En la Figura 34 se puede observar los metales que tuvieron una tendencia negativa, es decir que una variable va disminuyendo y la otra aumenta como lo es el caso de la precipitación y concentración de metales, los valores fueron cobre ( $r=-0.83$ ), vanadio ( $r=-0.17$ ) y arsénico ( $r=-0.36$ ) además se puede observar la variación en intensidad de lluvia en las tres estaciones de estudio.

Los resultados nos demuestran picos en concentraciones (mg/L) de cobre tiene variaciones más en el primer trimestre, siendo el pico más alto el 14 de mayo de

2019 con un valor de 0.025 mg/L y con 1.06 mm/día de lluvia. Vanadio tiene el pico más alto el 9 de mayo de 2019 con un valor de 0.005 mg/L y con 0.86 mm/día. Arsénico el pico más alto el 24 de octubre de 2019 con un valor de 0.166 mg/L y con 4.03 mm/día.

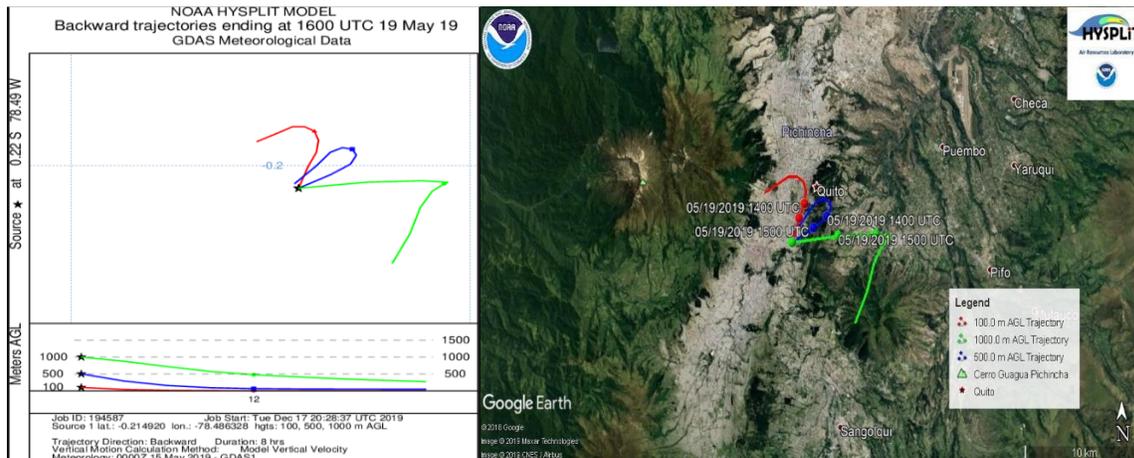


Figura 35. Trayectoria de flujo de viento hacia atrás en el tiempo del 19 de mayo de 2019.

Adaptado de Modelo Hysplit NOAA y Google Earth.

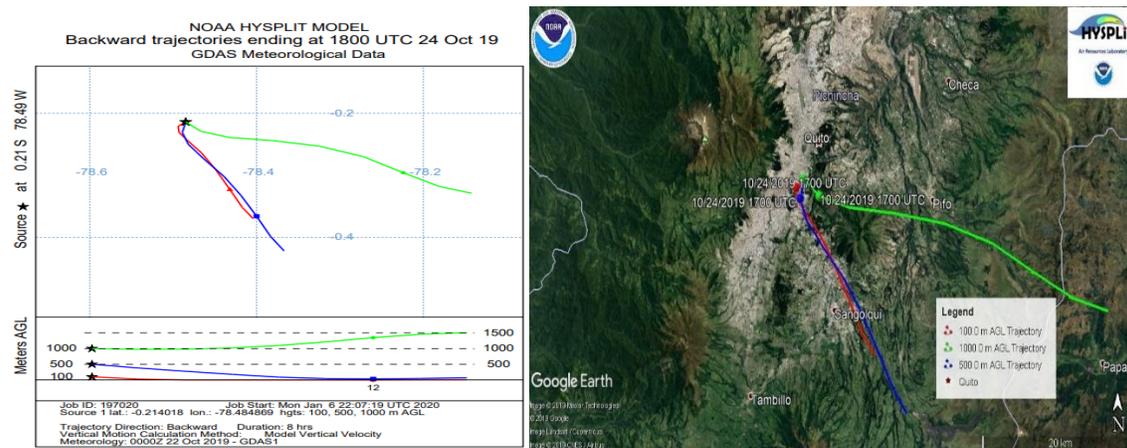


Figura 36. Trayectoria de flujo de viento hacia atrás en el tiempo del 24 de octubre de 2019.

Adaptado de Modelo Hysplit NOAA y Google Earth.

Acorde con los anteriores valores se relacionó con el flujo de masa de aire, como se muestra en las Figuras 35 y 36 siendo el 19 de mayo y 24 de octubre de 2019 los días más cercanos con los picos más altos en concentración de los metales ya mencionados. El viento también proviene en las 3 alturas en dirección sureste (SE) y este (E) es decir proveniente de los Valles, parte de la amazonia y occidente, como en la mayoría de otros casos. Esto demuestra que esto es la dirección de viento prevalente, y que en mayoría de los casos, la contaminación será recolectada en el camino de las masas del aire desde el Valle de Los Chillos y el sur de la ciudad. Lamentablemente, estas zonas contienen múltiples fuentes de industria y la planta termoeléctrica

#### 4.7.3.2 Metales de fuentes industriales con correlación positiva con la precipitación

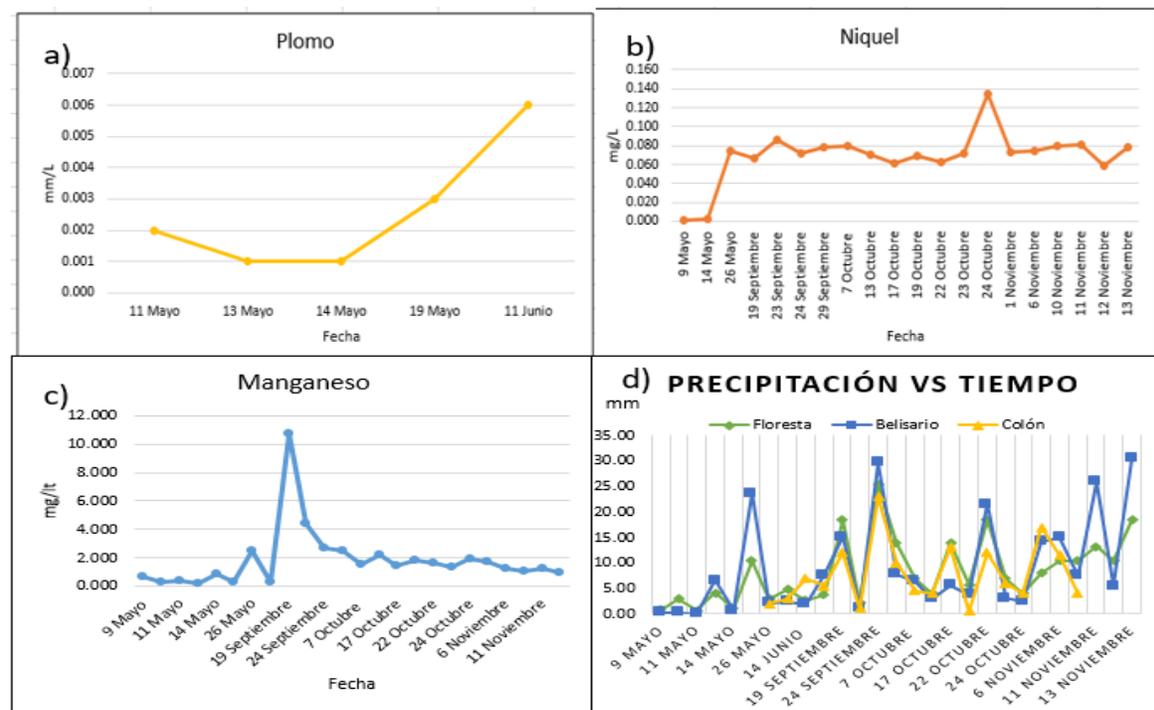


Figura 37. Metales de fuentes de industria con una correlación positiva.

a): Concentración de Plomo en todo el estudio.

b): Concentración de Níquel en todo el estudio.

c): Concentración de Manganeso en todo el estudio.

d): Precipitación total en tres estaciones.

Al contrario, en la Figura 37 nos enseña los metales que tuvieron una tendencia positiva, porque ambas variables van aumentando como lo es el caso de la precipitación y concentración de metales, los valores fueron plomo ( $r=0.36$ ), níquel ( $r=0.18$ ) y manganeso ( $r=0.1$ ) también se puede observar la variación en intensidad de lluvia en las tres sitios de estudio.

En este caso los resultados nos demuestran picos en concentraciones (mg/L) de plomo, siendo el pico más alto el 19 de mayo de 2019 con un valor de 0.003 mg/L y con 10.37 mm/día de lluvia. Níquel tiene variaciones en algunas fechas, siendo su pico más alto el 24 de octubre de 2019 con un valor de 0.135 mg/L y con 4.03 mm/día. Manganeso tiene una tendencia en casi todas las fechas, siendo el pico más alto el 23 de septiembre de 2019 con un valor de 0.042 mg/L y con 2.07 mm/día.

Estos valores fueron relacionados con el flujo de masa de aire, como se ve en la Figura 33 siendo el 23 de septiembre de 2019 el día con los picos más altos en concentración de los metales ya mencionados. El viento proviene en las 3 alturas en dirección sureste la tendencia del viento.

Acorde con otras investigaciones la concentración de Mn está relacionado con la mayor circulación de automotores y también por la actividad industrial. Según un estudio sobre la contaminación durante las protestas de transportistas que suscito en Bogotá (Pachón and Vela 2008). Cabe destacar que a diferencia de algunas ciudades en Quito y en todo el Ecuador el plomo fue prohibido desde el año 2000 para agregación a los combustibles (Zalakeviciute, Rybarczyk, et al. 2018).

De acuerdo con el Libro VI Anexo 1 Norma de Calidad Ambiental: Recurso Agua en la Tabla 2, de los metales por fuentes industriales: níquel ( $< 0.025$  mg/L) y

arsénico (< 0.05 mg/L) superan la dosis mínima para consumo en personas por lo que afecta a la salud llegando a ocasionar lesiones cutáneas y efectos respiratorios.

#### 4.7.4 Natural

Las fuentes naturales se caracterizan por los elementos abundantes en rocas de zonas montañosas y en el suelo, además están directamente relacionadas por los vientos locales, inclusive de emisiones producidas por volcanes, océanos y la erosión del suelo.

Tabla 9.

*Metales por fuente natural.*

| Metales de origen natural | Nomenclatura |
|---------------------------|--------------|
| Calcio                    | Ca           |
| Hierro                    | Fe           |
| Aluminio                  | Al           |
| Sodio                     | Na           |
| Litio                     | Li           |
| Plata                     | Ag           |
| Magnesio                  | Mg           |
| Silicio                   | Si           |

##### 4.7.4.1 Metales de fuentes naturales con correlación positiva con la precipitación

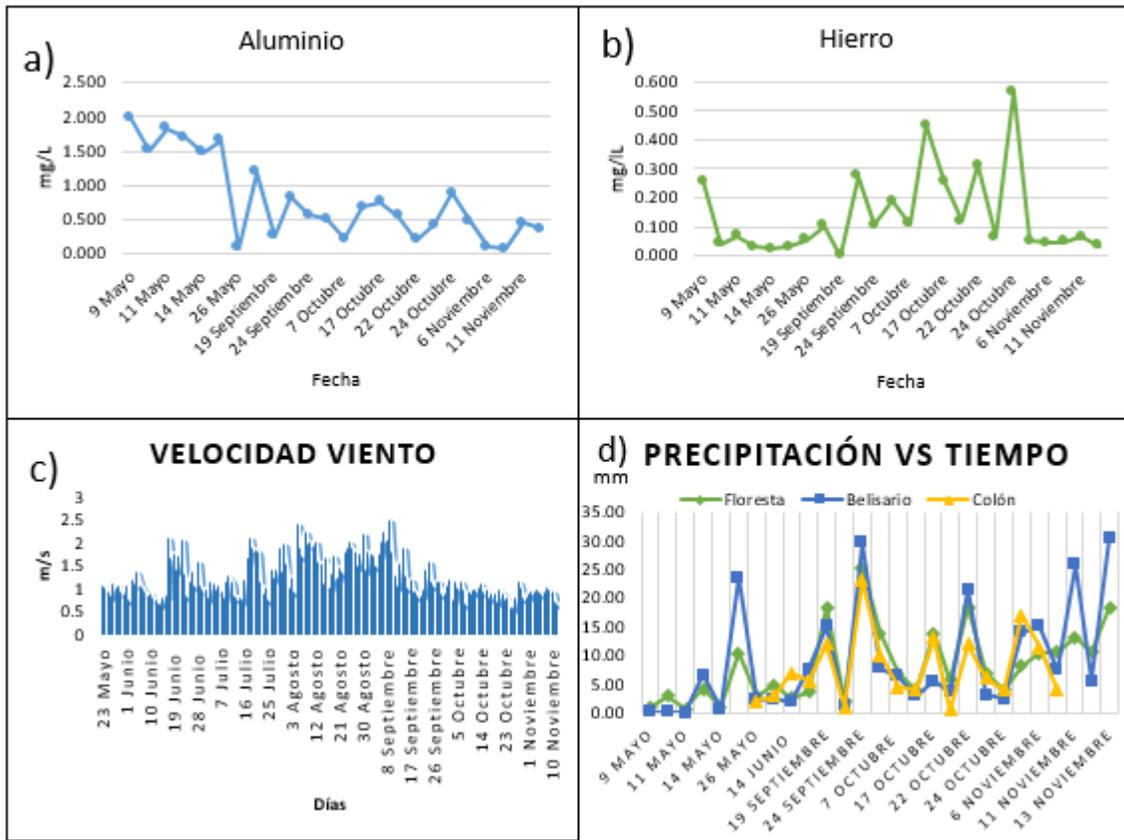


Figura 38. Metales de fuente natural con una correlación positiva.

a): Concentración de Aluminio en todo el estudio.

b): Concentración de Hierro en todo el estudio.

c): Velocidad de viento promedio de Udla-Colón.

d): Precipitación total en tres estaciones.

Se puede observar en la Figura 38 los metales que tuvieron una tendencia positiva, porque ambas variables van aumentando como lo es el caso de la precipitación y concentración de metales, los valores fueron aluminio ( $r=0.52$ ) y hierro ( $r=0.15$ ) también se puede observar la variación en intensidad de lluvia en las tres estaciones de estudio y la velocidad promedio de los vientos de estación Udla Colón, que nos permite ver que fechas en la cual el viento tiende a tener valores más altos como lo son los meses entre julio a septiembre.

Los resultados nos demuestran picos en concentraciones (mg/L). Hierro tiene el pico más alto el 24 de octubre de 2019 con un valor de 0.56 mg/L y con 4.03 mm/día. Aluminio tiene el pico más alto el 24 de octubre de 2019 con un valor de 1.98 mg/L y con 0.69 mm/día.

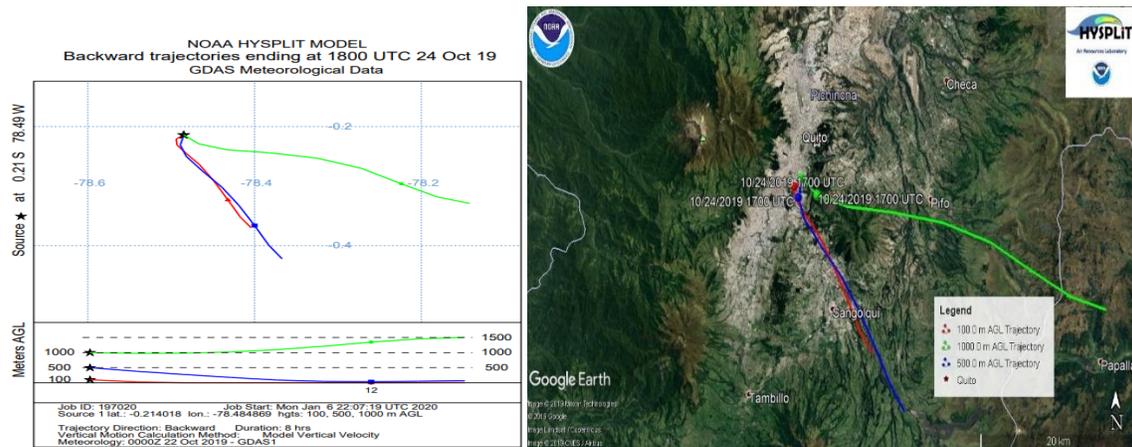


Figura 39. Trayectoria de flujo de viento hacia atrás en el tiempo del 24 de octubre de 2019.

Adaptado de Modelo Hysplit NOAA y Google Earth.

Estos valores fueron relacionados con el flujo de masa de aire, como se muestra en la Figura 39 siendo en ambos casos el 24 de octubre de 2019 el día con los picos más altos en concentración de los metales ya mencionados. El viento proviene en las 3 alturas en dirección sureste (SE) es decir viene de los Valles y sur de la ciudad.

Según un artículo de investigación en las partes periféricas de Quito existen diferentes tipos de fuentes fijas como lo son las canteras. Estas fuentes podrían ayudar a explicar por qué las regulaciones de combustible no fueron tan efectivas en las afueras (norte y sur) de la ciudad y estar directamente relacionadas con contaminantes como lo son aluminio y hierro (Zalakeviciute, Rybarczyk, et al. 2018).

#### 4.7.4.2 Metales de fuentes naturales con correlación negativa con la precipitación

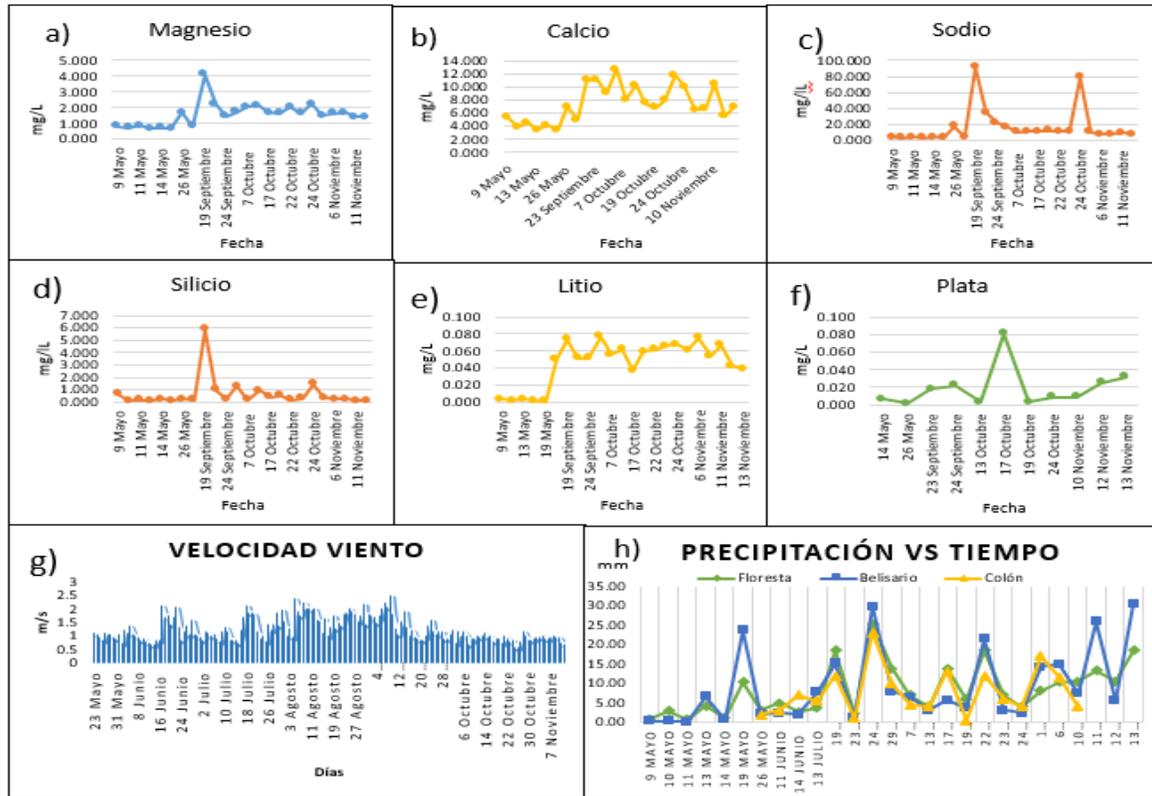


Figura 40. Metales de fuente natural con una correlación negativa.

- a): Concentración de Magnesio en todo el estudio.
- b): Concentración de Calcio en todo el estudio.
- c): Concentración de Sodio en todo el estudio.
- d): Concentración de Silicio en todo el estudio.
- e): Concentración de Litio en todo el estudio.
- f): Concentración de Plata en todo el estudio.
- g): Velocidad de viento promedio de Udl-Colón.
- h): Precipitación total en tres estaciones.

A diferencia del anterior figura, en la Figura 40 se puede observar los metales que tuvieron una tendencia negativa, es decir que una variable va disminuyendo y la otra aumenta como lo es el caso de la precipitación y concentración de metales, los valores fueron: magnesio ( $r=-0.33$ ), calcio ( $r=-0.30$ ), sodio ( $r=-0.20$ ), silicio( $r=-0.23$ ), litio ( $r=-0.38$ ) y plata ( $r=-0.49$ ). Además se puede observar la variación en intensidad de lluvia en las tres estaciones de estudio y la velocidad promedio de los vientos de estación Udla-Colón, que nos permite ver que fechas en las cuáles el viento tiende a tener valores más altos y aumentar las concentraciones de metales de origen natural por suspensión durante los meses entre julio a septiembre.

Los resultados nos demuestran picos en concentraciones (mg/L). Magnesio tiene el pico más alto el 19 de septiembre con un valor de 4.08 mg/L con 18.44 mm/día. Calcio tiene su pico más alto el 29 de septiembre de 2019 con un valor de 12.68 mg/L y con 13.83 mm/día. Sodio tiene el pico más alto el 19 de septiembre con un valor de 91.32 mg/L con 8 mm/día. Silicio tiene el pico más alto el 19 de septiembre con un valor de 5.84 mg/L con 18.44 mm/día. Litio tiene el pico más alto el 29 de septiembre con un valor de 0.077 mg/L con 13.83 mm/día finalmente Plata tiene el pico más alto el 17 de octubre con un valor de 0.081 mg/L con 13.83 mm/día.

Acorde con los anteriores valores se relacionó con el flujo de masa de aire, como se muestra en las Figuras 30 y 31 siendo el 19 de septiembre y 17 de octubre de 2019 los días más cercanos con los picos más altos en concentración de los metales ya mencionados. El viento proviene en las 3 alturas en dirección sureste (SE) y sur (S) es decir proveniente de los Valles y parte del sur de la ciudad de Quito.

Según otros estudios los metales se encuentran ampliamente distribuidos en el ambiente. Muchos, como el calcio (Ca), cobalto (Co), son micronutrientes y constituyen parte esencial de los sistemas biológicos (J. J. Rodríguez-Mercado, 2006). Además el sodio es un elemento metálico alcalino que se encuentra en la

tierra pues tiene gran afinidad por el oxígeno. El sodio no existe entre los minerales de elementos nativos, pues por sus características químicas al estar en contacto con la atmósfera el metal puro se oxida, dada su alta reactividad (Ramírez 2010). Se conoce también que el litio es un elemento abundante en la tierra, se encuentra en rocas, está asociado a los tipos de explotación en minas (Hoz, Martínez, and Vedia 2013). De esta manera, para complementar el magnesio también es un elemento abundante, con alrededor de un 2%. Además se utiliza para fabricar productos de aluminio y acero (Berrio, 2017).

De acuerdo con el Libro VI Anexo 1 Norma de Calidad Ambiental: Recurso Agua en la Tabla 2, de los metales por fuentes naturales: plata ( $< 0.05$  mg/L) y aluminio ( $< 0.02$  mg/L) superan la dosis mínima para consumo en personas por lo que afecta a la salud llegando a ocasionar daño al sistema nervioso y neumonitis química, que puede ser mortal.

#### 4.8 Concentración total de metales y comparación

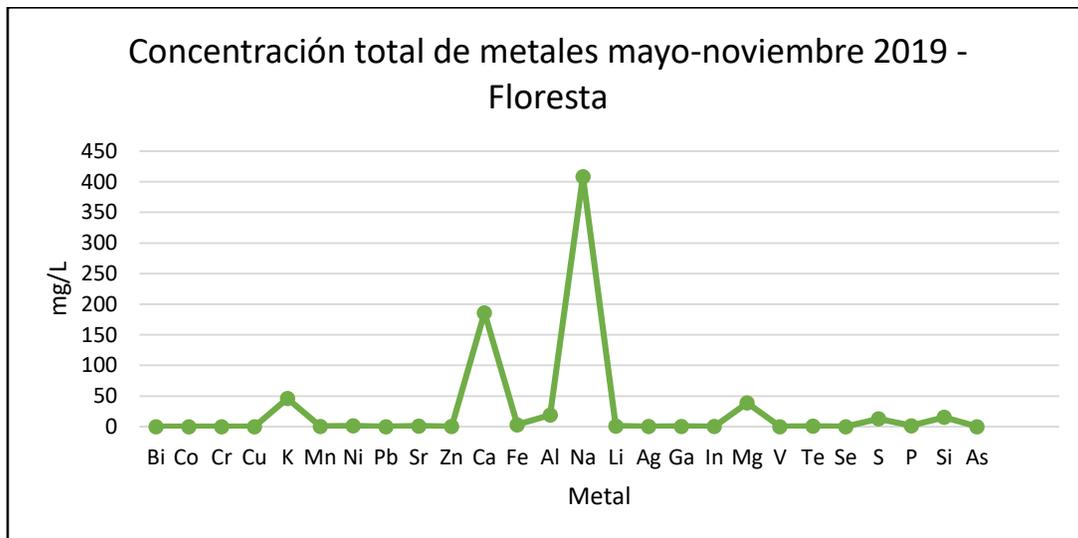


Figura 41. Sumatoria de concentración total de metales en Floresta.

En la Figura 41 se tiene la concentración de metales en el sector de La Floresta en 25 muestras desde mayo a noviembre de 2019. 14 muestras sobrepasaron los 6 mm/día de precipitación teniendo en total el pico más alto de Sodio (Na) con una

concentración de 408.61 mg/L seguido de calcio (Ca) con 186.017 mg/L. Potasio (K) con 45.98 mg/L y Magnesio (Mg) con 38.85 mg/L, los demás metales se mantuvieron en concentración similar.

Los metales predominantes son de origen natural por lo que el polvo prevalece en el sector que pudo haber traído los vientos de lugares más apartados de la ciudad. Se ha encontrado que las altas concentraciones de sodio y calcio en las ciudades se deben a los campos de cultivo que podrían incorporar elementos característicos del tipo de ese suelo en el material particulado  $Pm_{2.5}$  según (Pacsi Valdivia and Llanos Puga 2017). En contrario, K se podría originar de un incendio o quema de materia orgánica por causa antropogénica o natural.

#### 4.9 Metales de fuentes de incendio o quema

En los incendios la mineralización de la materia orgánica que induce el fuego conduce a la liberación de una cantidad de metales pesados, además las cenizas tienen cantidades variables de metales que pueden generar toxicidad al suelo y aguas subterráneas (Larios Bayona 2014).

En el caso de la quema de combustible doméstico se incluye leña, carbón y gas para cocinar o calentar. Un caso típico de contaminación del aire en el hogar es la quema de carbón para calefacción doméstica, donde la madera y el carbón son utilizados para calefacción doméstica (Karagulian et al. 2015).

Tabla 10.

*Metal por fuente de quema o incendio.*

| Metales por Quema | Nomenclatura |
|-------------------|--------------|
| Potasio           | K            |

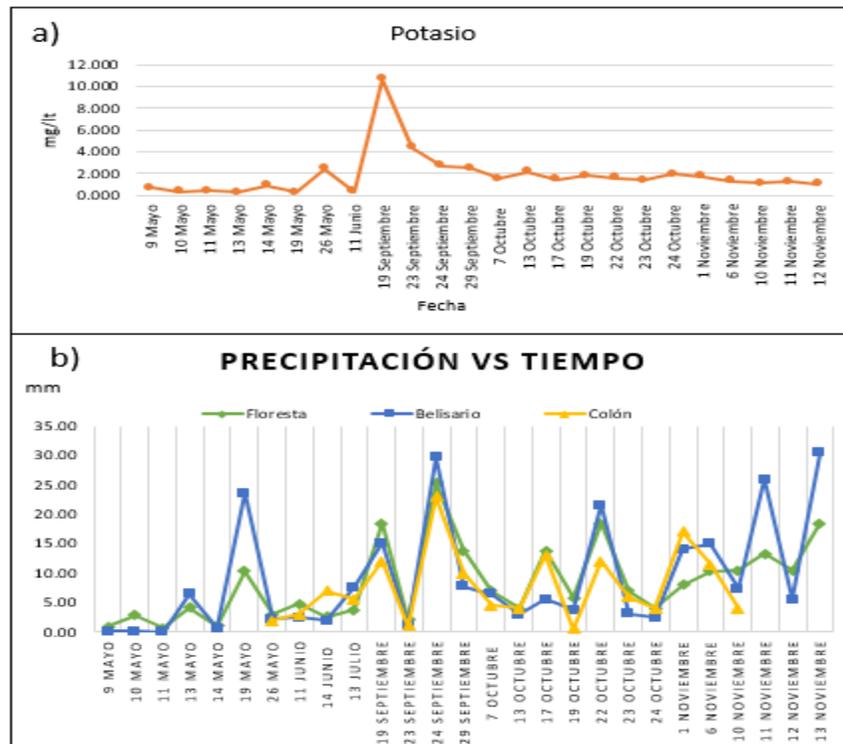


Figura 42. Metales de fuente natural con una correlación negativa.

a): Concentración de Potasio en todo el estudio.

b): Precipitación total en tres estaciones.

En la Figura 42 se puede observar al metal relacionado con quema o incendio que tuvo una tendencia positiva, con la precipitación ( $r=0.35$ ). También se puede apreciar la variación en intensidad de lluvia en los tres sitios de estudio.

Los resultados nos muestran concentraciones (mg/L) en Potasio el cual tiene su pico más alto el 19 de septiembre de 2019 con un valor de 10.70 mg/L y con 18.44 mm/día de lluvia.

Según una investigación los contaminantes producidos por incendio no sólo afectan la calidad del aire, sino que pueden afectar la calidad del agua de las precipitaciones con elementos metálicos y hollín (Mielnicki, Canziani, and Drummond 2004), por lo tanto sabemos que en el mes de septiembre de 2019 fue

la época seca en la cual se debieron controlar la mayoría de los incendios forestales a esto se atribuye la concentración más alta de potasio en septiembre.

Acorde con los anteriores valores se relacionó con el flujo de masa de aire, como se observa en la Figura 30 siendo el 19 de septiembre de 2019 el día con el pico más alto en concentración del metal ya mencionado. El viento proviene en las 3 alturas en dirección sur (S) y oeste (O) es decir proveniente de la parte sur de Quito. Esta zona esta conocida por lomas cubiertas por bosques. También se puede influenciar por quema de materia orgánica para calentamiento o cocina. La zona más al sur de la ciudad es más fría y menos pudiente.

Positivamente, metales de fuentes de incendio o quema no supera la dosis mínima para consumo en personas por lo que no afecta a la salud (Tabla 2).

#### 4.10 Análisis ANOVA de eventos de precipitación y composición química

Tabla 11

*Análisis estadístico para dos muestras emparejadas de Níquel.*

|                                | <i>Ni</i>  | <i>Ni</i>  |
|--------------------------------|------------|------------|
| Media                          | 0.06533333 | 0.04908333 |
| Varianza                       | 0.00048079 | 0.00213008 |
| Observaciones                  | 12         | 12         |
| Grados de libertad             | 11         |            |
| Estadístico t                  | 2.49399553 |            |
| P(T<=t) una cola               | 0.01491146 |            |
| Valor crítico de t (una cola)  | 1.79588482 |            |
| P(T<=t) dos colas              | 0.02982293 |            |
| Valor crítico de t (dos colas) | 2.20098516 |            |

Tabla 12

*Análisis estadístico para dos muestras emparejadas de Litio.*

|                    | <i>Li</i>  | <i>Li</i>  |
|--------------------|------------|------------|
| Media              | 0.05341667 | 0.035      |
| Varianza           | 0.00046536 | 0.00090564 |
| Observaciones      | 12         | 12         |
| Grados de libertad | 11         |            |
| Estadístico t      | 2.30014673 |            |
| P(T<=t) una cola   | 0.02101054 |            |

|                                |            |  |
|--------------------------------|------------|--|
| Valor crítico de t (una cola)  | 1.79588482 |  |
| P(T<=t) dos colas              | 0.04202108 |  |
| Valor crítico de t (dos colas) | 2.20098516 |  |

Tabla 13

*Análisis estadístico para dos muestras emparejadas de Aluminio.*

|                                | AI         | AI         |
|--------------------------------|------------|------------|
| Media                          | 0.94566667 | 0.471      |
| Varianza                       | 0.34666461 | 0.17936855 |
| Observaciones                  | 12         | 12         |
| Grados de libertad             | 11         |            |
| Estadístico t                  | 1.93668296 |            |
| P(T<=t) una cola               | 0.03944265 |            |
| Valor crítico de t (una cola)  | 1.79588482 |            |
| P(T<=t) dos colas              | 0.0788853  |            |
| Valor crítico de t (dos colas) | 2.20098516 |            |

En las Tablas 11, 12 y 13 podemos ver que hay una diferencia significativa entre las variables (X y Y) en metales como litio, níquel y aluminio. Las cuales fueron organizadas por dos categorías de precipitación > 9 mm y < 9 mm, a diferencia de los demás metales (Anexos 16) que no tienen una diferencia significativa. Esto nos demuestra la importancia en la remoción de estos metales de la atmósfera por los eventos de precipitación más intensos, a diferencia de lo que sucede con eventos de menor intensidad en donde se encuentra más concentración.

#### **4.11 Resultados de precipitación Valle de los Chillos y sur de la ciudad de Quito**

Tabla 14.

*Resultado de concentración de metales muestras Sur y Valle.*

| RESULTADOS METALES ppm (mg/L) |       |       |       |       |       |       |        |       |       |       |       |        |       |       |        |       |       |       |       |       |       |       |       |       |  |  |  |
|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--|--|--|
| MUESTRA                       | B     | Ba    | Bi    | Co    | Cr    | Cu    | K      | Mn    | Ni    | Sr    | Zn    | Ca     | Fe    | Al    | Na     | Li    | Ag    | Ga    | In    | Mg    | Te    | S     | P     | Si    |  |  |  |
| Muestra Sur-13oct-2019        | 0.120 | 0.578 | 0.019 | 0.003 | 0.008 | 0.010 | 61.329 | 0.041 | 0.101 | 0.090 | 0.034 | 16.876 | 0.201 | 0.789 | 16.774 | 0.102 | 0.012 | ND    | 0.020 | 1.789 | 0.001 | 0.390 | 0.076 | 0.920 |  |  |  |
| Muestra Valle-13oct-2019      | 0.045 | 0.391 | 0.009 | 0.001 | 0.005 | ND    | 51.329 | 0.027 | 0.075 | 0.050 | 0.027 | 13.466 | 0.166 | 0.546 | 12.948 | 0.077 | 0.009 | ND    | 0.011 | 1.466 | 0.001 | 0.086 | 0.045 | 0.802 |  |  |  |
| Muestra Sur-24oct-2019        | 0.073 | 0.310 | 0.019 | 0.005 | 0.020 | ND    | 4.098  | 0.040 | 0.090 | 0.094 | ND    | 14.990 | 0.103 | 0.671 | 23.009 | 0.099 | 0.018 | 0.030 | 0.020 | 3.098 | ND    | 2.908 | ND    | 6.903 |  |  |  |
| Muestra Valle-24oct-2019      | 0.067 | 0.282 | 0.012 | 0.001 | 0.011 | ND    | 3.041  | 0.031 | 0.075 | 0.099 | ND    | 13.928 | 0.090 | 0.502 | 21.299 | 0.084 | 0.013 | 0.023 | 0.016 | 3.433 | ND    | 2.759 | ND    | 6.366 |  |  |  |

En la Tabla 14 se muestra los resultados de metales en 4 muestras del segundo trimestre todas en el mes de octubre. Dos muestras fueron recolectadas en el Valle de Los Chillos y dos en el sur de la ciudad. En estas muestras se encontró la presencia de 24 metales.

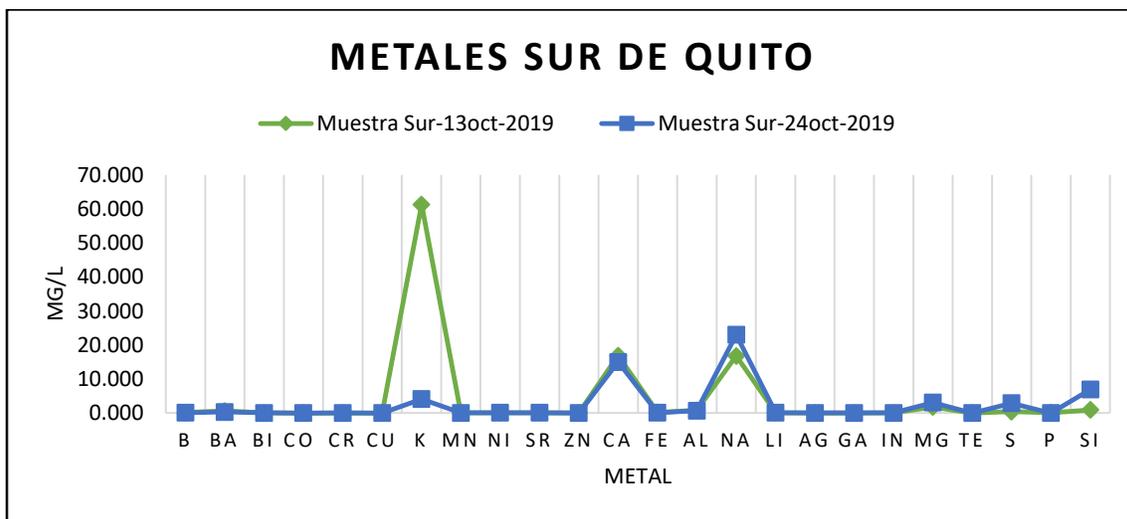
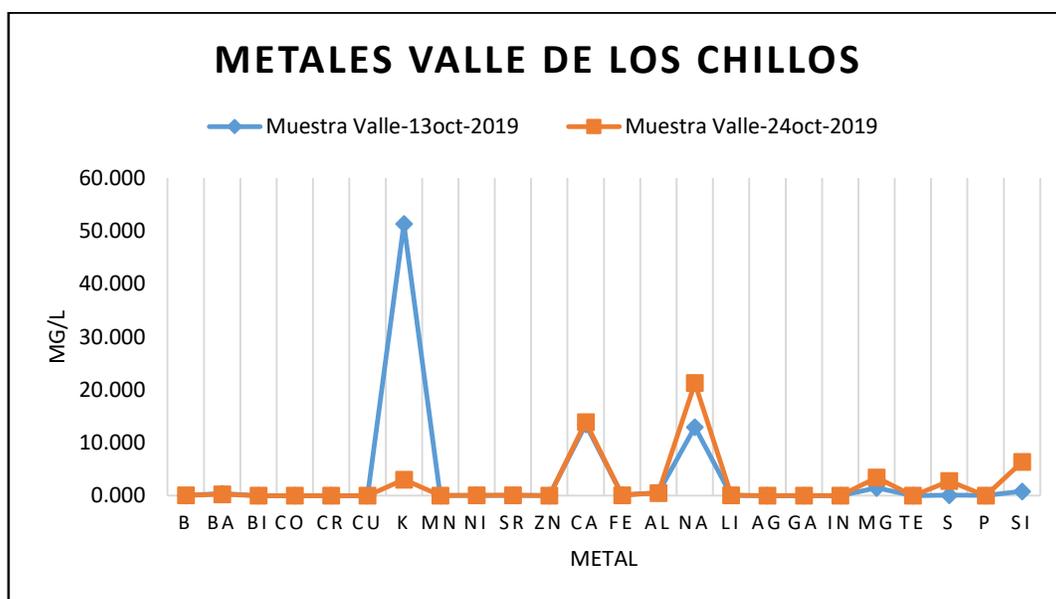


Figura 43. Concentración de metales en muestras Sur de Quito mes de octubre 2019.

En la Figura 43 se tiene la concentración de metales en el sur de la ciudad de Quito en el sector de la Villaflores en dos muestras del mes de octubre. Ambas fechas sobrepasaron los 10 mm/día de precipitación. En la primera muestra del 13 de octubre de 2019 el pico más alto es de potasio (K) con una concentración de 61.32 mg/L seguido de sodio (Na) con 16.77 mg/L y en el caso del 24 de octubre el pico más alto es de Na con 23.009 mg/L seguido de calcio 14.99 mg/L.

Los demás metales se mantuvieron en concentración similar de días normales. La presencia de metales representativos de fuentes naturales como Ca, Na, Si y Mg es esperado, por normalmente tener altas concentraciones en material particulado en el aire. Pero alto nivel de K demuestra condiciones de un incendio o quema extremo. Estas concentraciones de K en 13 de octubre sobrepasan concentraciones normales, que puede ser explicado por actividades de quema de llantas, madera etc. en la época de paro. Esto resulta en emisión alta de este elemento en la atmósfera, que durante este experimento se pudo capturar.

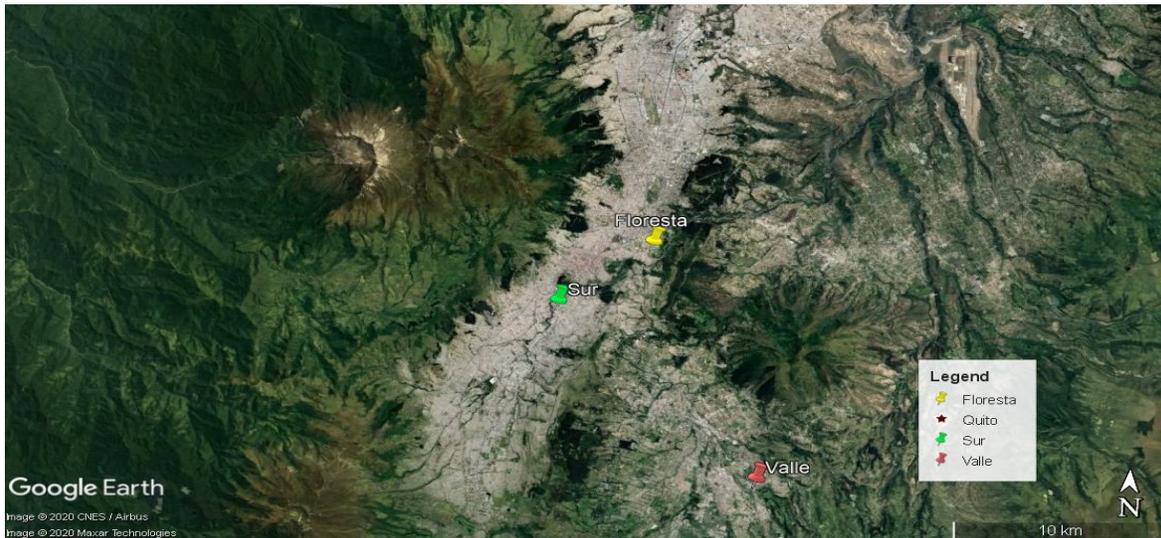


*Figura 44.* Concentración de metales en muestras Valle de Los Chillos mes de octubre 2019.

Similar al sur de Quito, en la Figura 44 se tiene la concentración de metales en el Valle de Los Chillos en el sector del Colibrí en 2 muestras del mes de octubre. Ambas sobrepasan los 10 mm/día de precipitación. En la primera muestra del 13 de octubre de 2019 el pico más alto, también como en sur de Quito, potasio (K) es 51.32 mg/L por quema de materiales durante el evento de paro de transportistas de la ciudad seguido de sodio (Na) con 12.94 mg/L y en el caso del 24 de octubre

el picos más alto fue 21.22 mg/L seguido de calcio 13.92 mg/L, los demás metales se mantuvieron en concentración normal.

#### 4.11.1 Comparación en diferentes sitios de la ciudad (Sur y Valle de los Chillos)



*Figura 45.* Lugares en los que se compararon datos de concentración.

Adaptado de Google Earth 2019.

Con las muestras (Valle, Sur y Floresta). Los resultados fueron similares en las concentraciones de los 3 primeros metales, en el Valle y sur predominaron sodio, calcio y potasio en ese orden con excepción del 13 de octubre en el cual potasio estuvo en primer lugar, mientras que en Floresta es algo similar los 3 primeros son sodio, calcio y potasio.

#### 4.12 Discusión dirección de viento

Para mejor definir los fuentes, se estudió la trayectoria del movimiento de las masas del aire (viento) con el uso del programa Hysplit donde se tomó en cuenta solo las fechas en las cuales el valor de precipitación fue alto es decir que supere los 8 mm/día y también los días que se tuvo mayor concentración de metales.

Tabla 15.

*Dirección el viento en eventos de precipitación más fuertes.*

| Fecha         | mm    | 100 m | 500 m | 1000 m | Hora |
|---------------|-------|-------|-------|--------|------|
| 19 mayo       | 10.37 | N     | N     | SE     | 16   |
| 19 septiembre | 18.44 | S     | S     | SE     | 15   |
| 24 septiembre | 25.36 | SE    | SE    | SE     | 17   |
| 29 septiembre | 13.83 | SE    | SE    | E      | 17   |
| 17 octubre    | 13.83 | SE    | SE    | SE     | 15   |
| 22 octubre    | 18.44 | O     | O     | NE     | 18   |
| 1 noviembre   | 8.07  | SE    | SE    | SE     | 18   |
| 6 noviembre   | 10.37 | SE    | SE    | E      | 19   |
| 10 noviembre  | 10.49 | S     | S     | S      | 21   |

Tabla 16.

*Dirección del viento en eventos de mayor concentración de metales.*

| Fecha         | mm   | 100 m | 500 m | 1000 m | Hora |
|---------------|------|-------|-------|--------|------|
| 23 septiembre | 2.07 | SE    | SE    | SE     | 17   |
| 24 octubre    | 4.03 | SE    | SE    | E      | 18   |

Donde:

|   |         |   |         |
|---|---------|---|---------|
|  | Oeste   |  | Este    |
|  | Sureste |  | Sur     |
|  | Norte   |  | Noreste |

De acuerdo a las anteriores Tablas 15 y 16 se determinó que la tendencia de los vientos proviene desde la dirección sureste (SE) y sur (S) en la mayoría de las fechas con mayor nivel de precipitación, siendo la trayectoria de masas con dirección sureste (SE) la más común presente en 7 fechas de las 9 seleccionadas por sus valores altos en concentración de metales y en precipitación, además en la tendencia de los eventos de precipitación estuvieron en un rango de 4 horas entre las 15:00 y 19:00 horas del día. Todo esto nos indica que los vientos en mayor parte vienen de los Valles cercanos a la ciudad y del sur. Acorde con un estudio (Nunez,

2016) se sabe que en la ciudad de Quito existe microclimas por varias razones. Entre ellas su orografía que va desde 2500 a 3000 msnm además por la presencia de los Valles de diversa dimensión y altura como Valle de Guayllabamba (1600 msnm), Los Chillos (2500 msnm), Tumbaco (2329 msnm) y Nayón-Cumbayá (2500 msnm). Por eso el enfrentamiento de vientos alisos del hemisferio sur que vienen por el oriente y los del hemisferio norte que vienen desde el Pacífico dictan e clima pero los vientos tienen además otro efecto climático que se siente en los Valles bajos creando una cúpula que cubre las hondonadas dando así un efecto invernadero. Esto como resultado, produce el clima subtropical de los Valles. Por último, se conoce que los vientos más rápidos provienen del sector de los Valles y sur entre las 10 y 16 horas.

#### 4.13 Resultados Aniones Floresta

Tabla 17.

*Resultados de aniones en muestras de precipitación en Floresta.*

| MUESTRAS AGUA DE LLUVIA |               |               |               |               |
|-------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| MUESTRA                 | Amonio mg/l   | Nitratos mg/l | Fosfatos mg/l | Sulfatos mg/l |
|                         | Concentración | Concentración | Concentración | Concentración |
| 19-Sep-19               | 0.102         | 0.520         | 0.327         | 12.672        |
| 23-Sep-19               | 0.099         | 0.515         | 0.324         | 12.500        |
| 24-Sep-19               | 0.091         | 0.520         | 0.282         | 12.931        |
| 26-Sep-19               | 0.078         | 0.473         | 0.271         | 12.845        |
| 29-Sep-19               | 0.082         | 0.571         | 0.241         | 11.983        |
| 07-Oct-19               | 0.111         | 1.367         | 0.575         | 32.500        |
| 13-Oct-19               | 0.121         | 1.302         | 0.477         | 38.103        |
| 17-Oct-19               | 0.200         | 1.158         | 0.485         | 37.845        |
| 19-Oct-19               | 0.191         | 1.102         | 0.481         | 28.534        |
| 22-Oct-19               | 0.189         | 1.079         | 0.534         | 27.500        |
| 23-Oct-19               | 0.178         | 1.256         | 0.474         | 29.224        |
| 24-Oct-19               | 0.170         | 1.023         | 0.432         | 29.569        |
| 01-Nov-19               | 0.058         | 0.501         | 0.357         | 19.655        |
| 06-Nov-19               | 0.057         | 0.692         | 0.275         | 20.603        |

|           |       |       |       |        |
|-----------|-------|-------|-------|--------|
| 10-Nov-19 | 0.049 | 0.646 | 0.215 | 18.707 |
| 11-Nov-19 | 0.052 | 0.692 | 0.211 | 19.914 |
| 12-Nov-19 | 0.067 | 0.497 | 0.222 | 17.759 |
| 13-Nov-19 | 0.050 | 0.487 | 0.252 | 15.086 |

En la Tabla 17 se muestra los resultados de aniones del segundo trimestre en cuatro tipos de aniones (amonio, nitrato, sulfato y fosfatos) medidos en 18 muestras de precipitación en el sector de La Floresta.

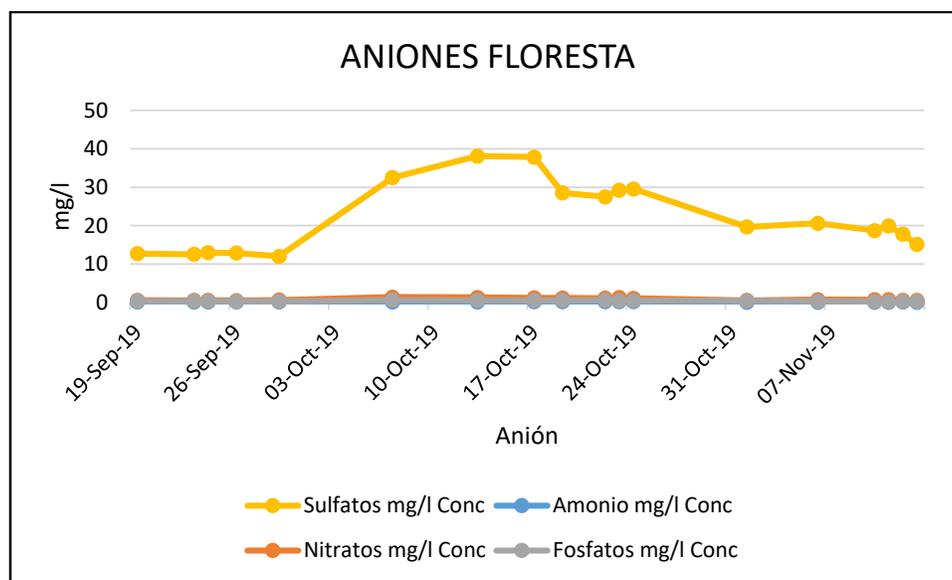


Figura 46. Concentración de aniones en muestras de Floresta.

#### 4.13.1 Análisis de aniones en Floresta

Acorde con la Figura 46 se muestran los cuatro tipos de aniones de La Floresta analizados en laboratorio en la cual la concentración de sulfatos con un valor de 38.10 mg/L el 13 de octubre de 2019 es la más alta con respecto a las demás.

El nitrato cuyo valor ocupa el segundo lugar con una concentración de 1.3 mg/L el 13 de octubre es un anión que está relacionado por las actividades industriales y de combustión (Bolaños-Alfaro et al. 2017).

El fosfato ocupa la misma posición del amonio, se sabe que el fosfato es un anión cuya proveniencia es variada se puede encontrar en detergentes, fertilizantes, en los desechos industriales o fuentes naturales y cuyo exceso puede ocasionar serios problemas a la salud de las personas (Bolaños-Alfaro et al. 2017).

De todas las concentraciones de aniones la única que sobrepasa el valor permisible para consumo es la de sulfato en todo el mes de octubre supera los 25 mg/L llegando a su más alta concentración de 38.10 mg/L el cual puede ocasionar problemas de salud. Según (Bolaños-Alfaro et al. 2017) se conoce que las altas concentraciones de sulfatos en agua lluvia están estrechamente relacionados con emisiones de  $SO_2$  por parte de los automotores a base de diésel.

#### 4.14 Resultados de aniones sur y Valle

Tabla 18.

*Resultado de aniones en muestras de precipitación en Sur y Valle.*

| MUESTRAS AGUA DE LLUVIA  |               |               |               |               |
|--------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| MUESTRA                  | Amonio mg/L   | Nitratos mg/L | Fosfatos mg/L | Sulfatos mg/L |
|                          | Concentración | Concentración | Concentración | Concentración |
| Muestra Sur-13oct-2019   | 0.200         | 1.302         | 0.380         | 34.224        |
| Muestra Valle-13oct-2019 | 0.187         | 1.256         | 0.361         | 47.500        |
| Muestra Sur-24oct-2019   | 0.099         | 0.846         | 0.357         | 25.517        |
| Muestra Valle-24oct-2019 | 0.100         | 0.888         | 0.380         | 24.397        |

En la Tabla 18 se muestra los resultados de aniones del segundo trimestre en cuatro tipos de aniones (amonio, nitrato, sulfato y fosfatos) medidos en 4 muestras de precipitación en el Valle de Los Chillos y Sur de Quito.

#### **4.14.1 Análisis de aniones sur y Valle**

Acorde con la Tabla 18 se muestra los resultados de los 4 tipos de aniones de Sur de Quito analizados en laboratorio en la cual la concentración de sulfatos con un valor de 34.22 mg/L el 13 de octubre de 2019 y 25.51 mg/L el 24 de octubre siendo las concentraciones de aniones más altas con respecto a las demás.

A continuación según en la Tabla 18 se muestra también los resultados en 4 tipos de aniones de Valle de Los Chillos analizados en laboratorio en la cual la concentración de sulfatos con un valor de 47.5 mg/L el 13 de octubre de 2019 y 24.39 mg/L el 24 de octubre siendo las concentraciones de aniones más altas con respecto a las demás.

Los resultados muestran la misma tendencia que las muestras de La Floresta, por lo que existe una alta concentración de sulfatos en la lluvia y como se mencionó anteriormente esto está relacionado al dióxido de azufre por el consumo de combustible, además del uso excesivo de gasolina e incendios. El día 13 de octubre es el día que más concentración de sulfato se tuvo en los 3 sitios de medición debido al ya mencionado paro de transportistas en ciertas zonas de la ciudad.

## **5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **5.1 Conclusiones**

El incremento de la población ha ocasionado el desarrollo de las industrias esto a su vez ha traído consecuencias hacia la atmósfera. La lluvia cumple la función de transportar y limpiar todo tipo de contaminante dirigiéndolo hacia la superficie de la tierra. Acorde con lo anterior en el presente estudio:

Se encontró 28 tipos de metales provenientes de distintas fuentes en 25 muestras recolectadas mediante la construcción de un prototipo convencional el cual permitió determinar las distintas categorías de eventos.

Se comparó los resultados de precipitación con otras estaciones (Colón y Belisario) confirmando resultados similares pero con pequeñas variaciones en algunos días, esto se debe a la presencia de microclimas en Quito.

Los más persistentes (fueron Ba, K, Mn, Sr, Ca, Al, Na, Mg y Si) en todas las 25 fechas de muestreo. Por el contrario la más baja era la presencia de (Pb). Esto se debe a prohibición del uso de Pb en combustibles en 2000.

Los elementos analizados en la zona centro-norte de Quito fueron influenciados por las condiciones meteorológicas de la ciudad (viento, temperatura).

Los metales Ni y As, provenientes de fuentes antropogénicas tráfico/industria, y Al con Ag de fuente natural superan las recomendaciones de salud.

Se determinó diferencias significativas en Al, Ni y Li en dos categorías de precipitación por lo que la concentración disminuyen a mayor cantidad de precipitación es decir en las muestras con mayor precipitación se tiene menor concentración de metales eso se debe al efecto de lavado de la atmósfera.

Los flujos de viento vienen en dirección sureste es decir desde los Valles y sur de la ciudad

La comparación de concentración de metales con otros sitios de la ciudad nos indicó una mayor concentración de Na, K y Ca en Floresta, Sur y Valle. Ca y Na estos son de origen natural, por lo se esperaría en una muestra con PM encontrar la mayoría de masa natural. La diferencia está que la mayor concentración de K sucedió durante los días del paro de transportistas siendo proveniente este metal de una fuente de quema.

Metales de fuentes naturales correlacionan con el viento, que tiene efecto de suspensión, y los antropogénicos efecto de ventilación o transporte

Los resultados de aniones en La Floresta, Sur y Valle demostraron que existe una alta concentración de sulfatos en la lluvia, relacionado al dióxido de azufre por el consumo del combustible diésel y la quema de gasolina.

## **5.2 Recomendaciones**

Este estudio es el más actual de los últimos 5 años en deposición húmeda en una zona urbana de la ciudad de Quito, por lo que es necesario contar con más sitios de medición en diferentes lugares de la ciudad y zonas aledañas en toda la época del año.

Es necesario realizar un análisis más exhaustivo en épocas de fin de año debido a la gran acumulación de contaminación que se tiene en esos días por las festividades seguramente son altas e incrementan la composición química de las precipitaciones.

La ciudad de Quito por sus condiciones climáticas ha presentado niveles altos en metales en algunos casos superan el límite en deposición húmeda por lo que es importante no consumir agua sin ser antes tratada o desinfectada.

Estaría interesante hacer un análisis más profundo en la composición química de las aguas lluvia debido a que se puede encontrar interesantes elementos o sustancias como es el caso de microplásticos.

## REFERENCIAS

- Argumedo, Carlos Julio. 2017. "Metales Pesados (Cd, Cu, V, Pb) En Agua Lluvia de La Zona de Mayor Influencia de La Mina de Carbón En La Guajira, Colombia." *Revista Colombiana de Química* 46(2):37.
- Bolaños-Alfaro, John Diego, Gloriana Cordero-Castro, and Gloriana Segura-Araya. 2017. "Determinación de Nitritos, Nitratos, Sulfatos y Fosfatos En Agua Potable Como Indicadores de Contaminación Ocasionada Por El Hombre, En Dos Cantones de Alajuela (Costa Rica)." *Revista Tecnología En Marcha* 30(4):15.
- Cordero Ordóñez, Ximena. 2014. "Microclima Y Confort Térmico Urbano." 112.
- DMQ. 2008. "Atlas Ambiental Del Distrito Metropolitano De Quito El Clima En El Distrito Metropolitano De Quito." 20–23.
- EMASEO., 2011. Municipio del distrito metropolitano de Quito: Plan de Desarrollo 2012–2022. Quito. Recuperado el 24 de Octubre de 2019 en: <http://www.emaseo.gob.ec/>
- Fernando, Luis, Garcés Giraldo, Marta Lucía, and Hernández Ángel. 2004. "La Lluvia Ácida: Un Fenómeno Fisioquímico de Ocurrencia Local."
- Flores, Javier. 2005. "La Precipitación." *UAAAN*.
- Flores, Ronny and Pablo Bonilla. 2010. "Perfil de La Lluvia Ácida En La Ciudad de Quito (Ecuador) Durante Los Meses de Diciembre." 01(01):27–34.
- García de Pedraza, Lorenzo. 2010. "Nieve y Granizo: Conceptos Básicos. (RAM)." 25 25:5.
- García, Mario, Hermes Ramírez, Ángel Meulenert, Jaime Arellano, and Jesús Espinosa. 2006. "De Guadalajara , Jalisco , México I Nfluences of Polluting Agents So 2 and No 2 in the Formation of Acid Rain in the G Uadalajara Metropolitan Zone ( Zmg ), J Alisco , M Éxico."
- Granados, D., F. López, and M. Hernández. 2010. "La Lluvia Ácida Y Los Ecosistemas Forestales." *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales Y Del Ambiente* XVI(2):187–206.
- Horacio, Lic and E. Sarochar. 2011. "Curso de Divulgación Introducción a la

- Meteorología General.” 25.
- Hoz, Mauro De, Verónica Rocío Martínez, and José Luis Vedia. 2013. “Artículos El Litio : Desde Los Salares de La Puna a Nuestros Celulares.” *Artículos El Litio : Desde Los Salares de La Puna a Nuestros Celulares* 3(5):58–67.
- Huguet, Nuria, Marta Schuhmacher, Jose Domongo, and Juan Llobet. 2007. “Metales Pesados y Salud: Diseño de Un Software Para Evaluar Los Riesgos de La Exposición Ambiental a Través Del Agua, Suelos y Aire.” *Mapfre Seguridad, ISSN 0212-1050, Año Nº 27, Nº 108, 2007, Págs. 50-58* 27(108):50–58.
- INEC., 2011. Población, superficie (km<sup>2</sup>), densidad poblacional a nivel parroquial. Quito. Recuperado el 23 de Octubre de 2019 en: [www.ecuadorencifras.gob.ec/institucional/home/](http://www.ecuadorencifras.gob.ec/institucional/home/)
- Karagulian, Federico, Claudio A. Belis, Carlos Francisco C. Dora, Annette M. Prüss-Ustün, Sophie Bonjour, Heather Adair-Rohani, and Markus Amann. 2015. “Contributions to Cities’ Ambient Particulate Matter (PM): A Systematic Review of Local Source Contributions at Global Level.” *Atmospheric Environment* 120:475–83.
- Lamprea, Katerine and Véronique Ruban. 2011. “Characterization of Atmospheric Deposition and Runoff Water in a Small Suburban Catchment.” *Environmental Technology* 32(10):1141–49.
- Larios Bayona, María. 2014. “Niveles de Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb Y Zn en los suelos de ribera de la cuenca del río Turia.” 1–153.
- Lutgens, Frederick K. and Edward J. Tarbuck. 2013. *The Atmosphere. An Introduction to Meteorology.*
- Martines, Enrique and Adalberto Gómez. 2008. “Cálculo de La Temperatura de Punto de Rocío a Diferentes Valores de Presión.” *Simposio de Metrología* 22 al 24 d:1.
- Matthews, John A. 2014. “Urban Climate.” *Encyclopedia of Environmental Change* 1–3.
- Mejía, Carlos Alfonso Zafra, Edgar Camilo Luengas Pinzón, and Javier Temprano

- González. 2013. "Influencia Del Tráfico En La Acumulación de Metales Pesados Sobre Vías Urbanas: Torrelavega (España)-Soacha (Colombia)." *Revista Facultad de Ingeniería* (67):146–60.
- Mielnicki, D. M., P. O. Canziani, and J. Drummond. 2004. "Quema de Biomasa En El Centro-Sur de Sudamerica: Incendios Locales, Impactos Regionales." (April 2015):10.
- OIEA/GNIP. 2014. "Guía Para El Muestreo de La Precipitación." 19.
- Olcina Cantos, Jorge, Antonio Manuel Rico Amorós, and Arturo Jiménez Rodríguez. 1998. "Las Tormentas de Granizo En La Comunidad Valenciana : Cartografía de Riesgo En La Actividad Agraria." *Investigaciones Geográficas* (19):5–29.
- OMM. 1983. "Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos. Quinta Edición, Capítulo 7, OMM-N' 8, Ginebra."
- Pachón, Jorge Eduardo and Hugo Sarmiento Vela. 2008. "Análisis Espacio-Temporal de La Concentración de Metales Pesados En La Localidad de Puente Aranda de Bogotá-Colombia." *Revista Facultad de Ingeniería* (43):120–33.
- Pacsi Valdivia, Sergio and Cesar Manuel Llanos Puga. 2017. "Evaluación de La Composición Química Del Material Particulado PM2,5 En La Universidad Nacional Agraria La Molina." *Anales Científicos* 78(2):210.
- Palacios, Juan and Darwin Rosero. 2014. "Análisis de Las Condiciones Climáticas Registradas En El Ecuador Continental En El Año 2013 y Su Impacto En El Sector Agrícola." 1–27.
- Ramírez Ortega, Antonio. 2010. "El Sodio En a Naturaleza." *Anales de La Real Academia de Doctores de España* 14:213–23.
- Ramírez, Sebastián Marcelo and Hernán Arturo Viteri. 2014. "Diagnóstico de La Problemática Ambiental Causada Por El Desecho de Las Baterías Del Parque Automotor Del Cantón Cuenca."
- Reyes, Yulieth, Ines Vergara, and Omar Torres. 2016. "CONTAMINACIÓN POR METALES PESADOS : IMPLICACIONES EN SALUD , AMBIENTE Y

- SEGURIDAD ALIMENTARIA Heavy Metals Contamination : Implications for Health and Food Safety.” 16:66–77.
- Rodríguez-Heredia, Dunia. 2017. “Los Metales Pesados y La Salud En Las Comunidades Costeras Aledañas a La Bahía de Santiago de Cuba.” *Medisan* 21(12):3372–85.
- Rodríguez, Armando; Sánchez, Claudia. 2005. “Lluvia Ácida y Sus Efectos.” *Lluvia Ácida* 1–14.
- Rodríguez, Juan and Mario Altamirano. 2006. “VANADIO: CONTAMINACIÓN, METABOLISMO Y GENOTOXICIDAD.” *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental* 22(4):173–89.
- Santana Pérez, Luis Manuel, José Manuel, and Hernández Abreu. 2003. “La Precipitación De Niebla En Tenerife.”
- Stein, A. F., R. R. Draxler, G. D. Rolph, B. J. B. Stunder, M. D. Cohen, and F. Ngan. 2015. “Noaa’s Hysplit Atmospheric Transport and Dispersion Modeling System.” *Bulletin of the American Meteorological Society* 96(12):2059–77.
- Universidad Augtonoma de España. 2012. “Guia de Uso de Ácido Nítrico.” 78.
- Varas, E. 2014. “3. Precipitación 3.1.” 1–18.
- Vermette, Stephen J., Mark E. Peden, Tim C. Willoughby, Steven E. Lindberg, and Aaron D. Weiss. 1995. “Methodology for the Sampling of Metals in Precipitation: Results of the National Atmospheric Deposition Program (NADP) Pilot Network.” *Atmospheric Environment* 29(11):1221–29.
- Wallace, John M. and Peter V. Hobbs. 2006. *Atmospheric Science: An Introductory Survey: Second Edition*.
- Wu, Yanan, Jiakai Liu, Jiexiu Zhai, Ling Cong, Yu Wang, Wenmei Ma, Zhenming Zhang, and Chunyi Li. 2018. “Comparison of Dry and Wet Deposition of Particulate Matter in Near-Surface Waters during Summer.” *PLoS ONE* 13(6):1–15.
- Yu, Xingna, Jia Ma, Junlin An, Liang Yuan, Bin Zhu, Duanyang Liu, Jing Wang, Yang Yang, and Huxiong Cui. 2016. “Impacts of Meteorological Condition and Aerosol Chemical Compositions on Visibility Impairment in Nanjing, China.”

*Journal of Cleaner Production* 131:112–20.

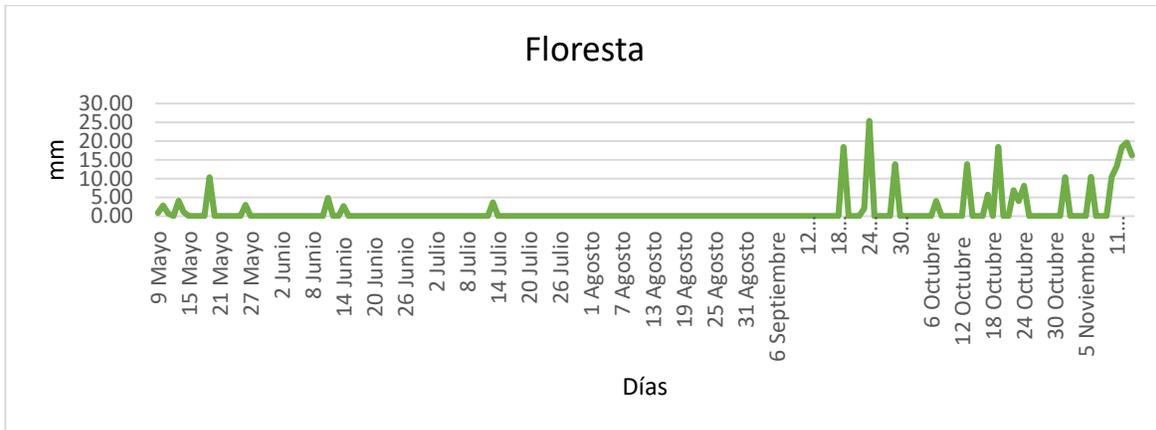
Zalakeviciute, Rasa, Jesús López-Villada, and Yves Rybarczyk. 2018. “Contrasted Effects of Relative Humidity and Precipitation on Urban PM<sub>2.5</sub> Pollution in High Elevation Urban Areas.” *Sustainability* 10(6):2064.

Zalakeviciute, Rasa, Yves Rybarczyk, Katuska Alexandrino, Maria Granda, and Maria Valeria Diaz Suarez. 2019. “Chemical Characterization of Urban PM<sub>10</sub> in the Tropical Andes.” 1–50.

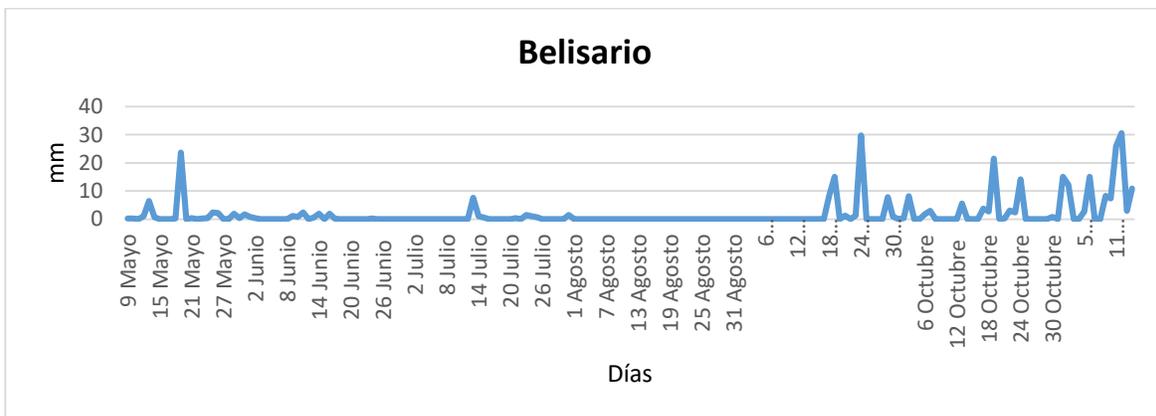
Zalakeviciute, Rasa, Yves Rybarczyk, Jesús López-Villada, and Maria Valeria Diaz Suarez. 2018. “Quantifying Decade-Long Effects of Fuel and Traffic Regulations on Urban Ambient PM<sub>2.5</sub> Pollution in a Mid-Size South American City.” *Atmospheric Pollution Research* 9(1):66–75.

# **ANEXOS**

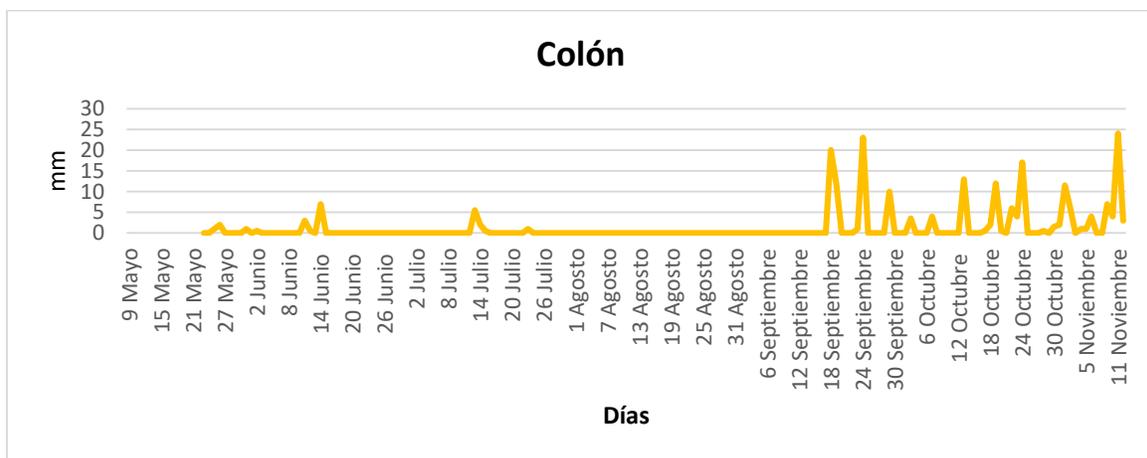
**Anexo 1.** Precipitación total en Floresta durante los meses de estudio.



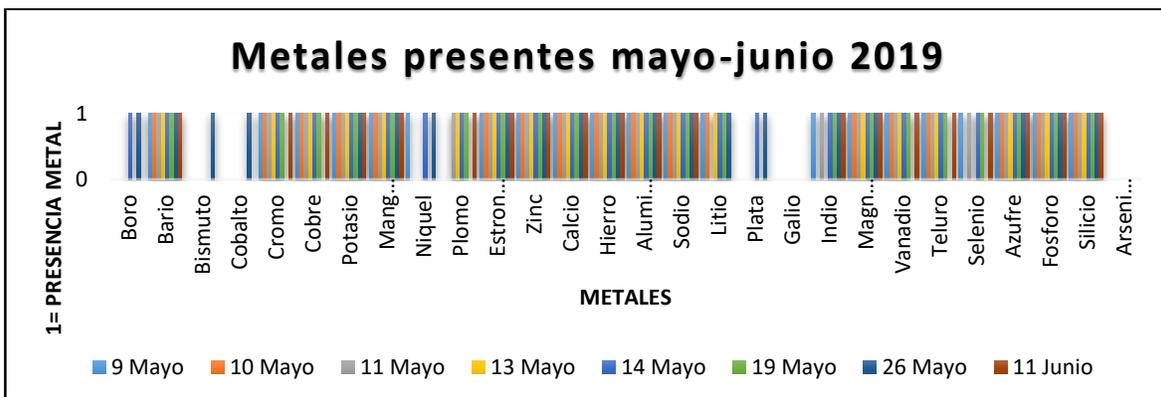
**Anexo 2.** Precipitación total en Belisario durante los meses de estudio.



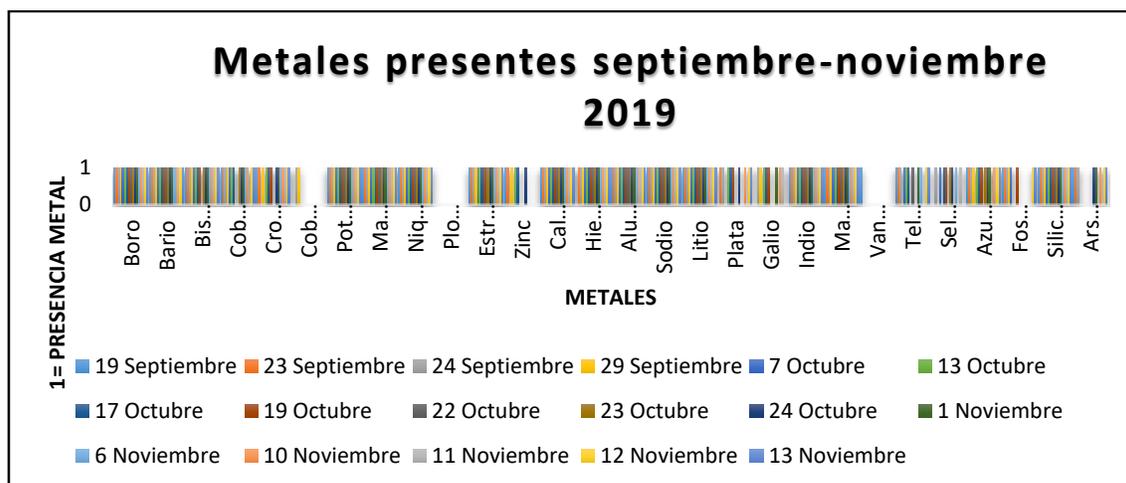
**Anexo 3.** Precipitación total en Colón durante los meses de estudio.



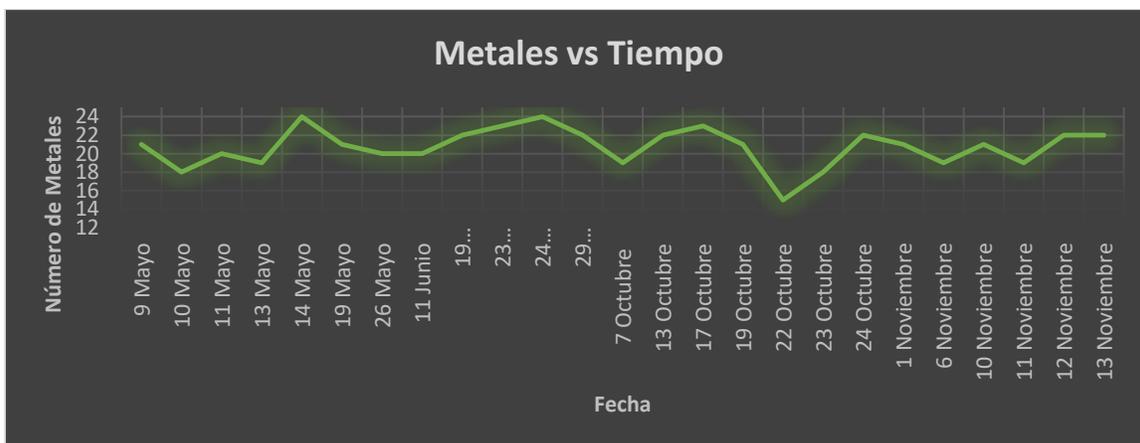
**Anexo 4.** Presencia individual de metales en el primer trimestre de estudio.



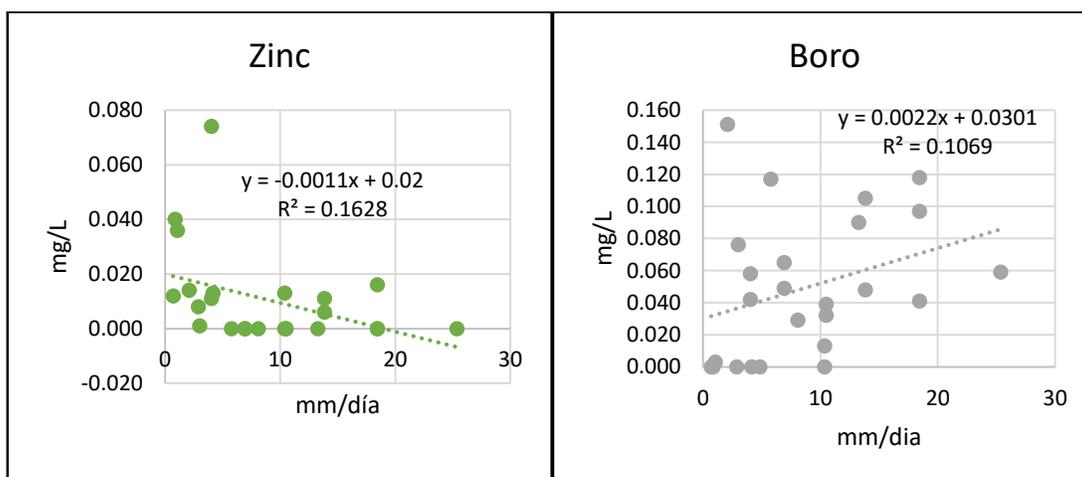
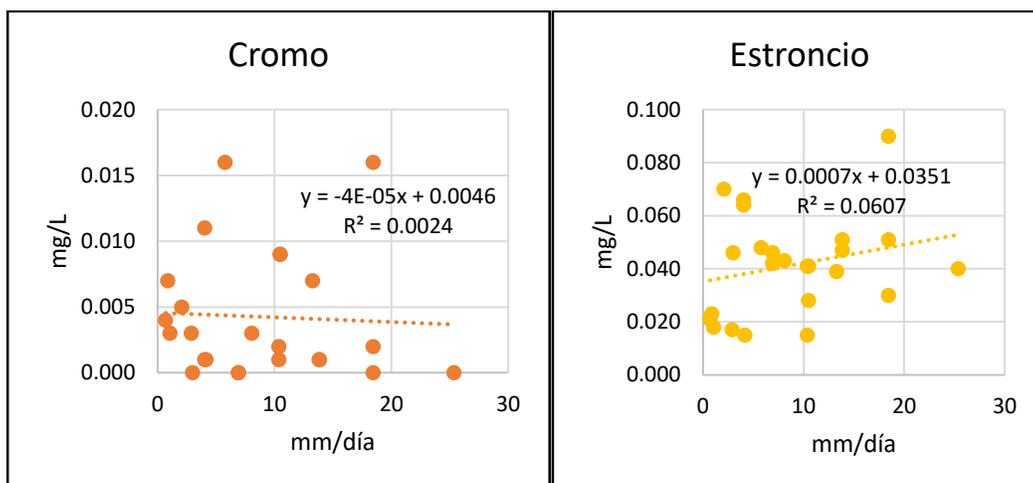
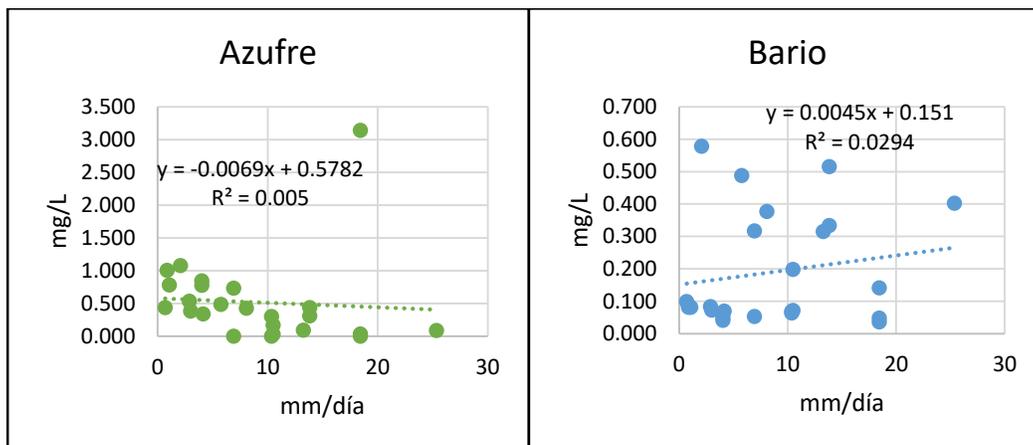
**Anexo 5.** Presencia de individual de metales en el segundo semestre de estudio.



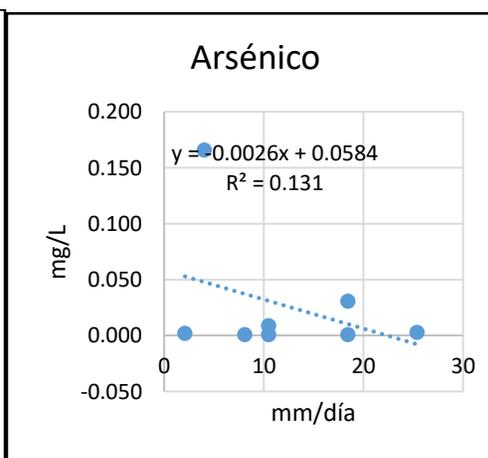
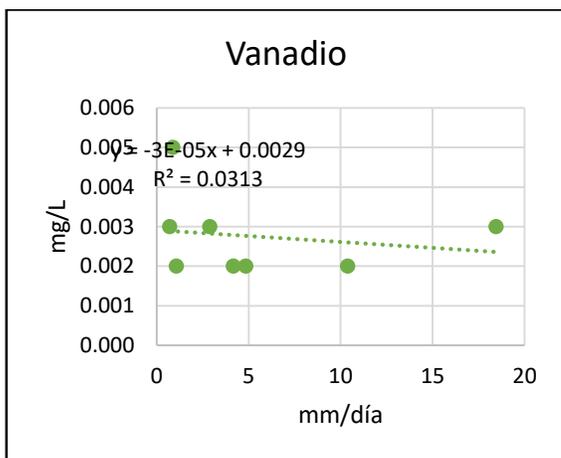
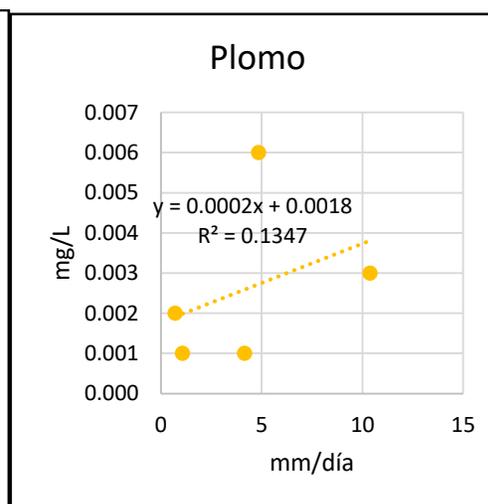
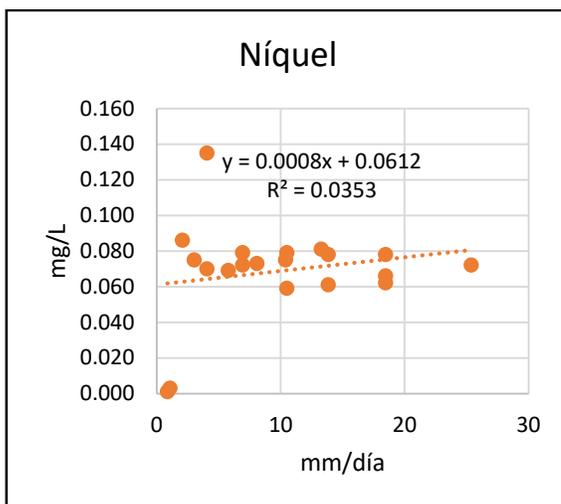
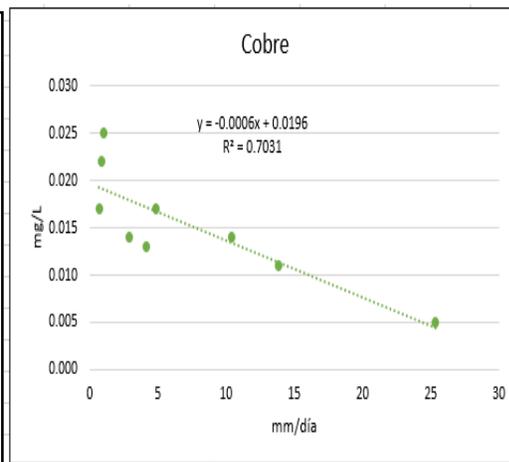
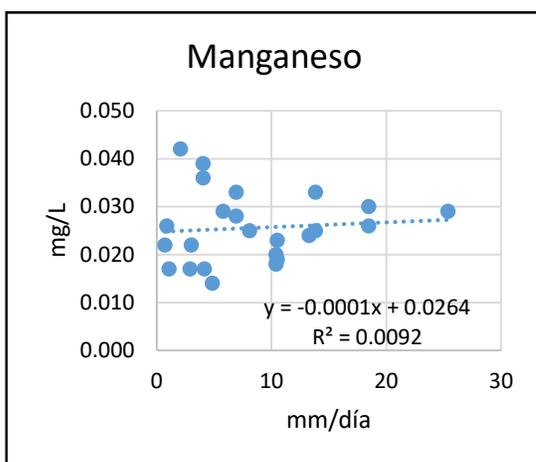
**Anexo 5.** Cantidad de metales en total por día en cada muestra analizada en ICP.



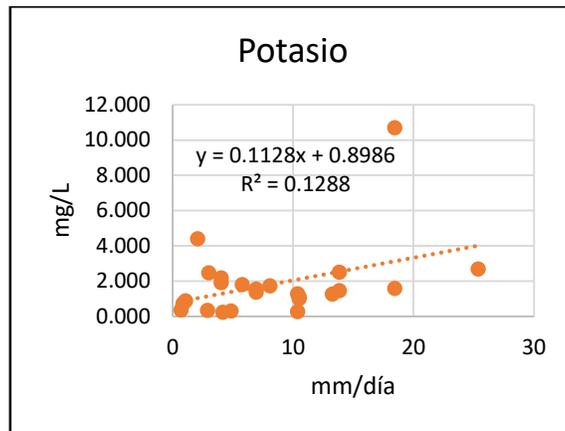
## Anexo 6. Correlaciones de metales por fuente de tráfico.



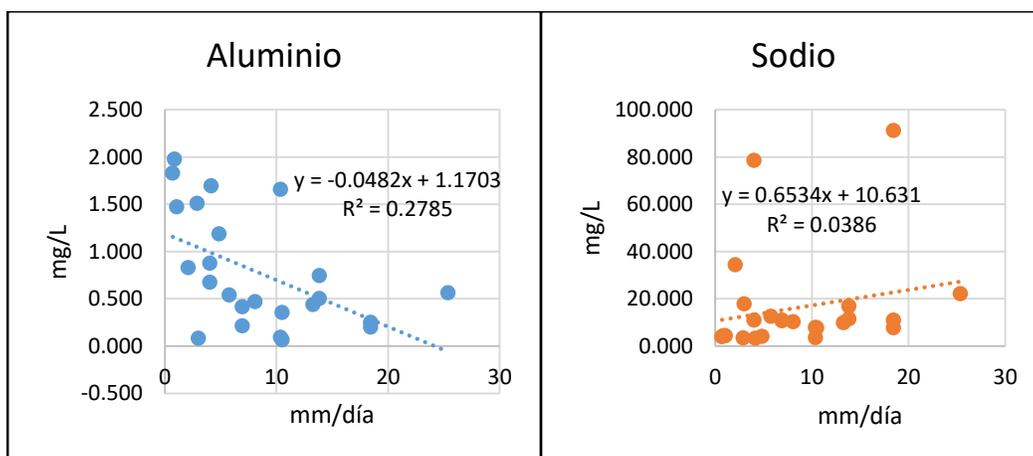
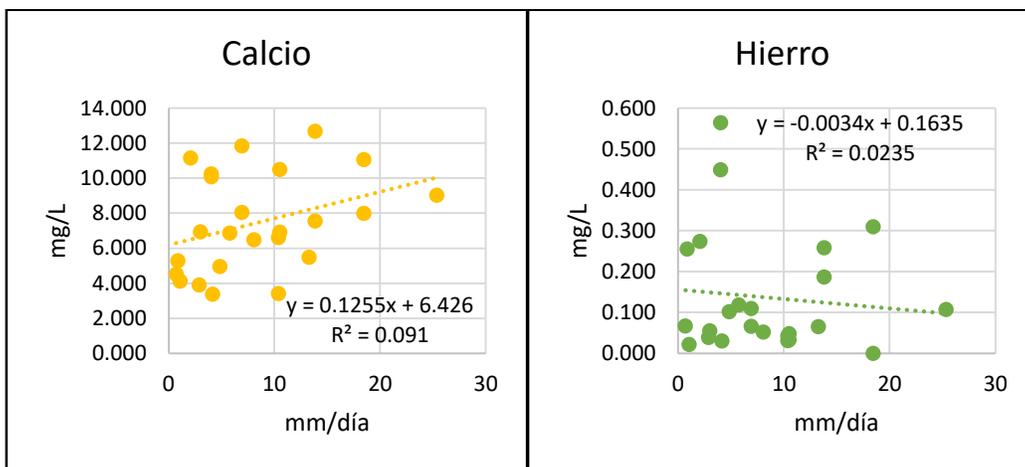
**Anexo 7. Correlaciones de metales por fuente de industria.**

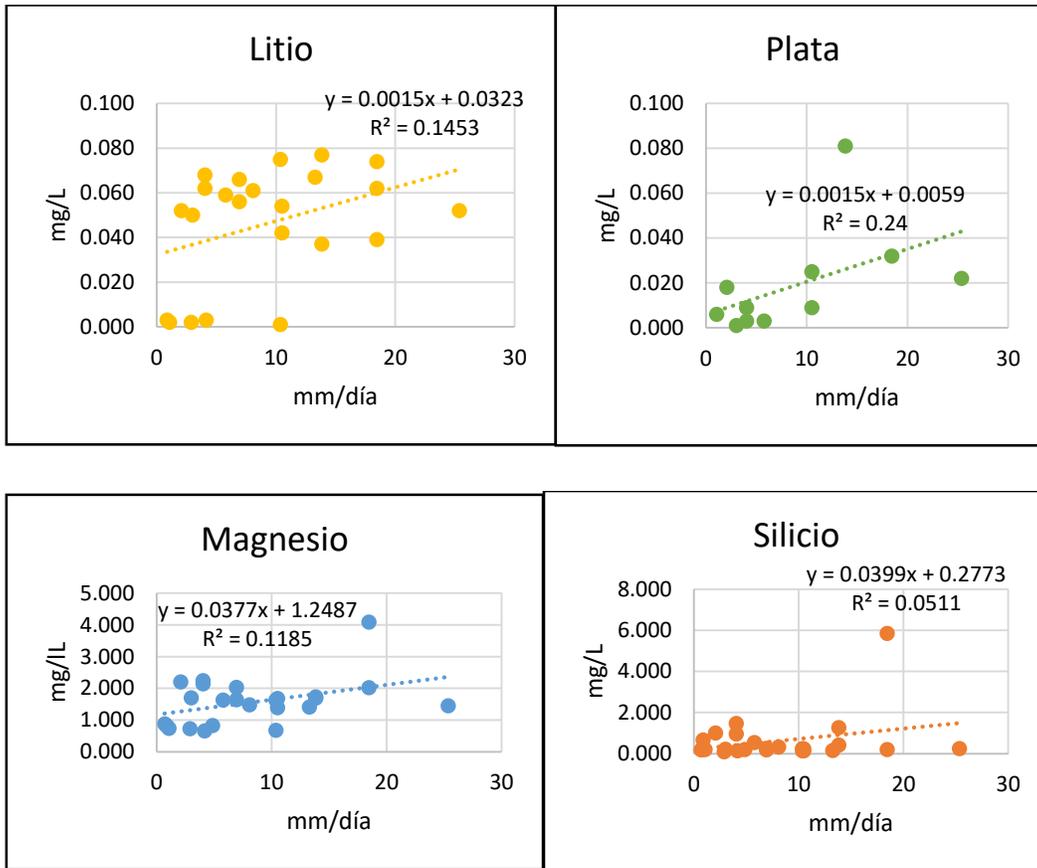


**Anexo 8.** Correlaciones de metales por fuente de quema.

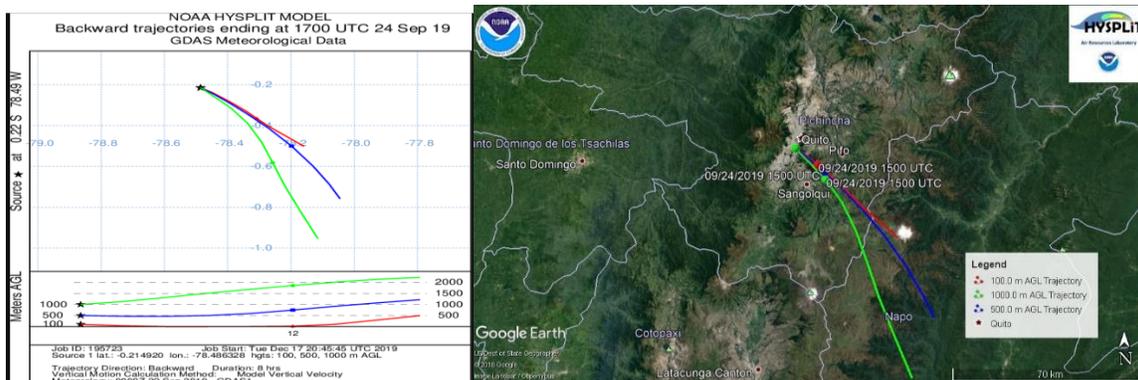


**Anexo 9.** Correlaciones de metales por fuente de natural.

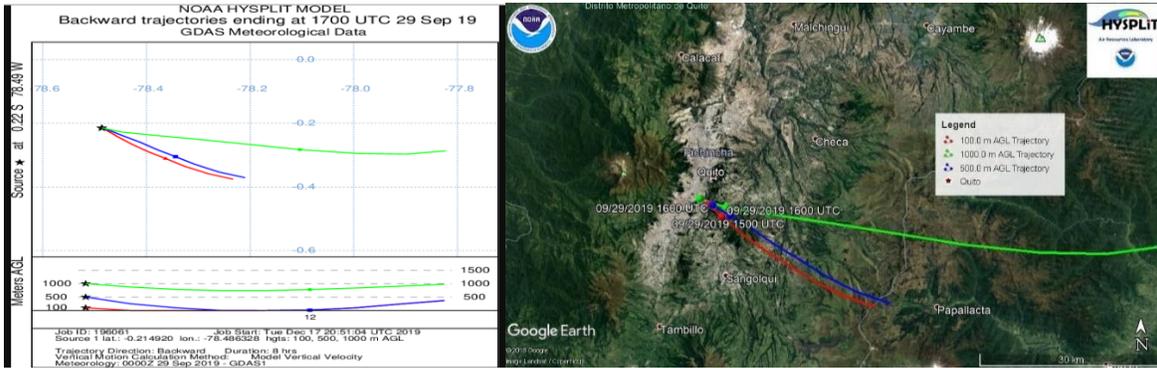




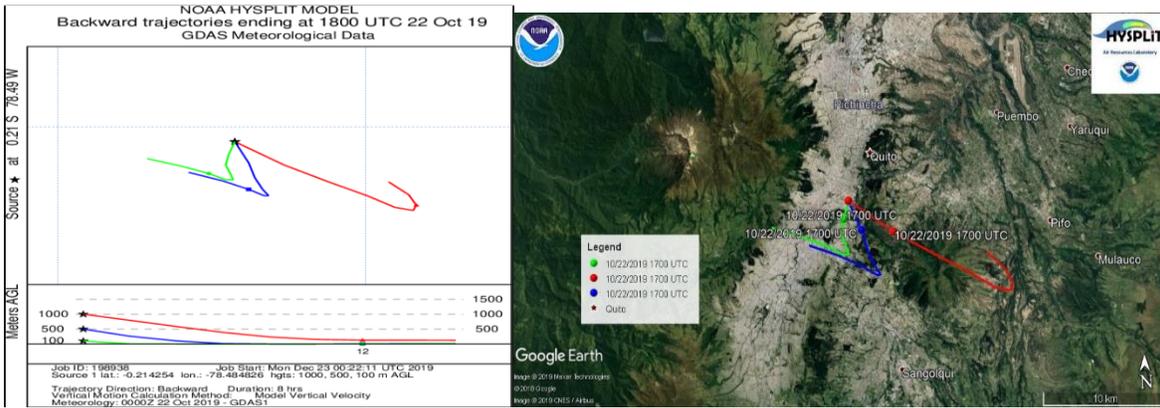
**Anexo 10.** Trayectoria de flujo de viento hacia atrás en el tiempo del 24 de septiembre de 2019. Tomado de Modelo Hysplit NOAA y Google Earth.



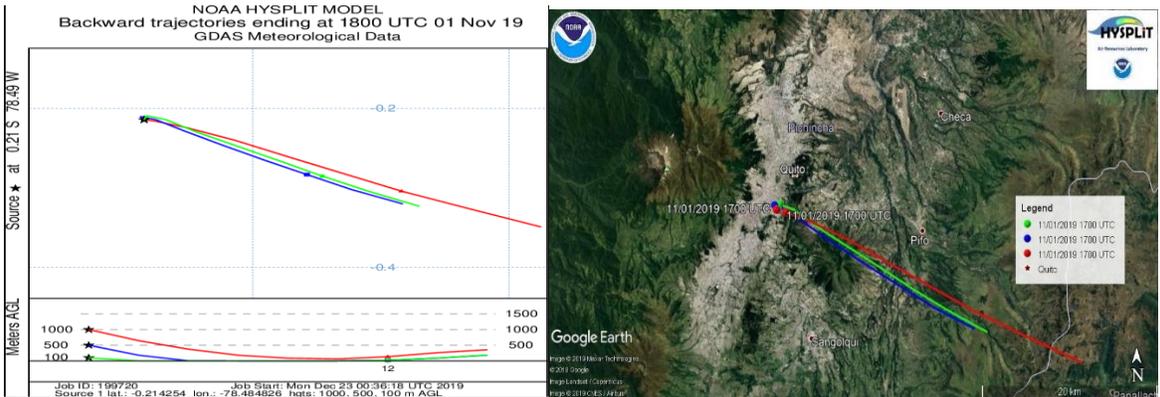
**Anexo 11.** Trayectoria de flujo de viento hacia atrás en el tiempo del 29 de septiembre de 2019. Tomado de Modelo Hysplit NOAA y Google Earth.



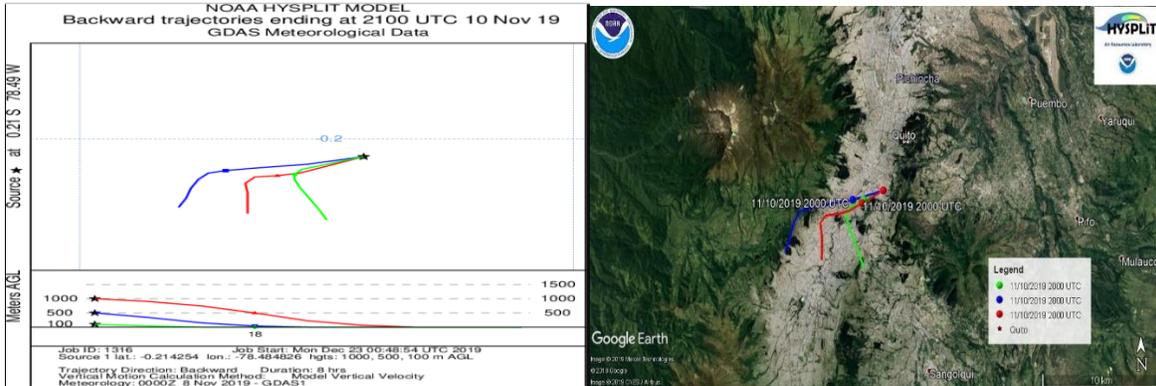
**Anexo 12.** Trayectoria de flujo de viento hacia atrás en el tiempo del 22 de octubre de 2019. Tomado de Modelo Hysplit NOAA y Google Earth



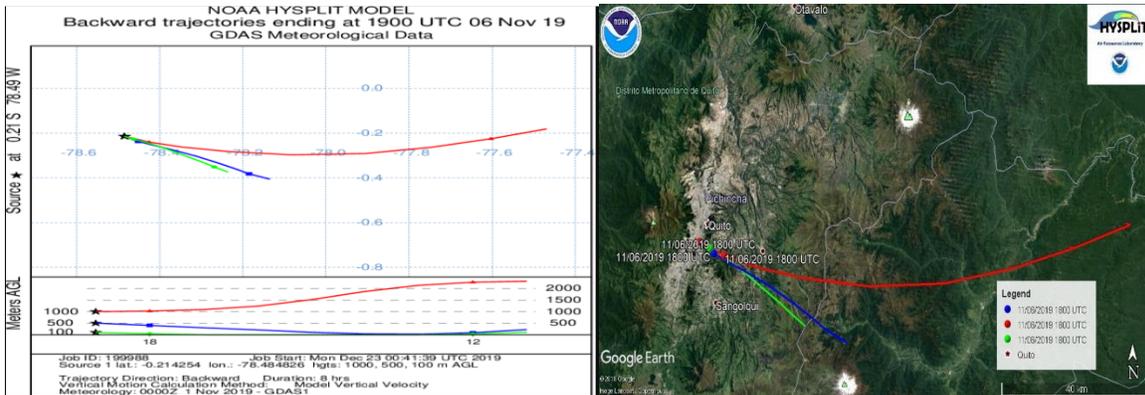
**Anexo 13.** Trayectoria de flujo de viento hacia atrás en el tiempo del 1 de noviembre de 2019. Tomado de Modelo Hysplit NOAA y Google Earth.



**Anexo 14.** Trayectoria de flujo de viento hacia atrás en el tiempo del 10 de noviembre de 2019. Tomado de Modelo Hysplit NOAA y Google Earth.



**Anexo 15.** Trayectoria de flujo de viento hacia atrás en el tiempo del 19 de noviembre de 2019. Tomado de Modelo Hysplit NOAA y Google Earth.



**Anexo 16.** ANOVA de eventos de precipitación y composición química

|                                       | <b>Ba</b> | <b>Ba</b> |
|---------------------------------------|-----------|-----------|
| <b>Media</b>                          | 0.168083  | 0.214     |
| <b>Varianza</b>                       | 0.034656  | 0.02778   |
| <b>Estadístico t</b>                  | -0.56352  |           |
| <b>P(T&lt;=t) una cola</b>            | 0.292191  |           |
| <b>Valor crítico de t (una cola)</b>  | 1.79588   |           |
| <b>P(T&lt;=t) dos colas</b>           | 0.584382  |           |
| <b>Valor crítico de t (dos colas)</b> | 2.200985  |           |

|                                       | <b>B</b> | <b>B</b> |
|---------------------------------------|----------|----------|
| <b>Media</b>                          | 0.046    | 0.055916 |
| <b>Varianza</b>                       | 0.002527 | 0.001450 |
| <b>Estadístico t</b>                  | -0.45463 |          |
| <b>P(T&lt;=t) una cola</b>            | 0.329105 |          |
| <b>Valor crítico de t (una cola)</b>  | 1.795884 |          |
| <b>P(T&lt;=t) dos colas</b>           | 0.658210 |          |
| <b>Valor crítico de t (dos colas)</b> | 2.200985 |          |

|                                       | <b>Cr</b>       | <b>Cr</b> |
|---------------------------------------|-----------------|-----------|
| <b>Media</b>                          | 0.003           | 0.004     |
| <b>Varianza</b>                       | 2.45E-05        | 2.48E-05  |
| <b>Estadístico t</b>                  | -0.27865        |           |
| <b>P(T&lt;=t) una cola</b>            | 0.392840        |           |
| <b>Valor crítico de t (una cola)</b>  | 1.795884        |           |
| <b>P(T&lt;=t) dos colas</b>           | <b>0.785680</b> |           |
| <b>Valor crítico de t (dos colas)</b> | 2.200985        |           |

|                                       | <b>Cu</b> | <b>Cu</b> |
|---------------------------------------|-----------|-----------|
| <b>Media</b>                          | 0.007166  | 0.0025    |
| <b>Varianza</b>                       | 8.65E-05  | 2.42E-05  |
| <b>Estadístico t</b>                  | 1.552509  |           |
| <b>P(T&lt;=t) una cola</b>            | 0.074410  |           |
| <b>Valor crítico de t (una cola)</b>  | 1.795884  |           |
| <b>P(T&lt;=t) dos colas</b>           | 0.148820  |           |
| <b>Valor crítico de t (dos colas)</b> | 2.200985  |           |

|                                       | <b>K</b> | <b>K</b> |
|---------------------------------------|----------|----------|
| <b>Media</b>                          | 2.29583  | 1.47     |
| <b>Varianza</b>                       | 7.43526  | 1.46566  |
| <b>Estadístico t</b>                  | 1.01851  |          |
| <b>P(T&lt;=t) una cola</b>            | 0.16515  |          |
| <b>Valor crítico de t (una cola)</b>  | 1.79588  |          |
| <b>P(T&lt;=t) dos colas</b>           | 0.33031  |          |
| <b>Valor crítico de t (dos colas)</b> | 2.20098  |          |

|                                       | <b>Mn</b> | <b>Mn</b> |
|---------------------------------------|-----------|-----------|
| <b>Media</b>                          | 0.026333  | 0.023416  |
| <b>Varianza</b>                       | 9.13E-05  | 4.06E-05  |
| <b>Estadístico t</b>                  | 0.564576  |           |
| <b>P(T&lt;=t) una cola</b>            | 0.291845  |           |
| <b>Valor crítico de t (una cola)</b>  | 1.795884  |           |
| <b>P(T&lt;=t) dos colas</b>           | 0.583691  |           |
| <b>Valor crítico de t (dos colas)</b> | 2.200985  |           |

|                                       | <b>Pb</b> | <b>Pb</b> |
|---------------------------------------|-----------|-----------|
| <b>Media</b>                          | 0.000833  | 0.00025   |
| <b>Varianza</b>                       | 3.06E-06  | 0.0000007 |
| <b>Estadístico t</b>                  | 0.978453  |           |
| <b>P(T&lt;=t) una cola</b>            | 0.17443   |           |
| <b>Valor crítico de t (una cola)</b>  | 1.795884  |           |
| <b>P(T&lt;=t) dos colas</b>           | 0.348879  |           |
| <b>Valor crítico de t (dos colas)</b> | 2.200985  |           |

|                                       | <b>Sr</b> | <b>Sr</b> |
|---------------------------------------|-----------|-----------|
| <b>Media</b>                          | 0.039     | 0.043     |
| <b>Varianza</b>                       | 0.00042   | 0.00032   |
| <b>Estadístico t</b>                  | -0.3324   |           |
| <b>P(T&lt;=t) una cola</b>            | 0.37289   |           |
| <b>Valor crítico de t (una cola)</b>  | 1.79584   |           |
| <b>P(T&lt;=t) dos colas</b>           | 0.74578   |           |
| <b>Valor crítico de t (dos colas)</b> | 2.2009    |           |

|                                       | <b>Zn</b> | <b>Zn</b> |
|---------------------------------------|-----------|-----------|
| <b>Media</b>                          | 0.0148    | 0.003833  |
| <b>Varianza</b>                       | 0.0004    | 3.68E-05  |
| <b>Estadístico t</b>                  | 1.7081    |           |
| <b>P(T&lt;=t) una cola</b>            | 0.0578    |           |
| <b>Valor crítico de t (una cola)</b>  | 1.7958    |           |
| <b>P(T&lt;=t) dos colas</b>           | 0.1156    |           |
| <b>Valor crítico de t (dos colas)</b> | 2.2009    |           |

|                                       | <b>Ca</b> | <b>Ca</b> |
|---------------------------------------|-----------|-----------|
| <b>Media</b>                          | 7.17      | 7.891416  |
| <b>Varianza</b>                       | 9.341334  | 6.575118  |
| <b>Estadístico t</b>                  | -0.45681  |           |
| <b>P(T&lt;=t) una cola</b>            | 0.328348  |           |
| <b>Valor crítico de t (una cola)</b>  | 1.795884  |           |
| <b>P(T&lt;=t) dos colas</b>           | 0.656696  |           |
| <b>Valor crítico de t (dos colas)</b> | 2.200985  |           |

|                                       | <b>Fe</b> | <b>Fe</b> |
|---------------------------------------|-----------|-----------|
| <b>Media</b>                          | 0.158     | 0.096083  |
| <b>Varianza</b>                       | 0.031491  | 0.010162  |
| <b>Estadístico t</b>                  | 0.891753  |           |
| <b>P(T&lt;=t) una cola</b>            | 0.195807  |           |
| <b>Valor crítico de t (una cola)</b>  | 1.795884  |           |
| <b>P(T&lt;=t) dos colas</b>           | 0.391614  |           |
| <b>Valor crítico de t (dos colas)</b> | 2.200985  |           |

|                                       | <b>Na</b> | <b>Na</b> |
|---------------------------------------|-----------|-----------|
| <b>Media</b>                          | 16.3412   | 17.34241  |
| <b>Varianza</b>                       | 461.559   | 566.100   |
| <b>Estadístico t</b>                  | -0.09312  |           |
| <b>P(T&lt;=t) una cola</b>            | 0.46373   |           |
| <b>Valor crítico de t (una cola)</b>  | 1.795884  |           |
| <b>P(T&lt;=t) dos colas</b>           | 0.92747   |           |
| <b>Valor crítico de t (dos colas)</b> | 2.20098   |           |

|                                       | <b>Ag</b> | <b>Ag</b> |
|---------------------------------------|-----------|-----------|
| <b>Media</b>                          | 0.003333  | 0.014083  |
| <b>Varianza</b>                       | 2.96E-05  | 0.000581  |
| <b>Observaciones</b>                  | 12        | 12        |
| <b>Estadístico t</b>                  | -1.54357  |           |
| <b>P(T&lt;=t) una cola</b>            | 0.075477  |           |
| <b>Valor crítico de t (una cola)</b>  | 1.795884  |           |
| <b>P(T&lt;=t) dos colas</b>           | 0.150954  |           |
| <b>Valor crítico de t (dos colas)</b> | 2.200985  |           |

|                                       | <b>Mg</b> | <b>Mg</b> |
|---------------------------------------|-----------|-----------|
| <b>Media</b>                          | 1.454     | 1.715166  |
| <b>Varianza</b>                       | 0.411134  | 0.662033  |
| <b>Observaciones</b>                  | 12        | 12        |
| <b>Estadístico t</b>                  | -0.664368 |           |
| <b>P(T&lt;=t) una cola</b>            | 0.260068  |           |
| <b>Valor crítico de t (una cola)</b>  | 1.795884  |           |
| <b>P(T&lt;=t) dos colas</b>           | 0.520137  |           |
| <b>Valor crítico de t (dos colas)</b> | 2.200985  |           |

|                                       | <b>V</b> | <b>V</b> |
|---------------------------------------|----------|----------|
| <b>Media</b>                          | 0.001    | 0.000416 |
| <b>Varianza</b>                       | 1.63E-06 | 9.92E-07 |
| <b>Observaciones</b>                  | 12       | 12       |
| <b>Estadístico t</b>                  | 1.46540  |          |
| <b>P(T&lt;=t) una cola</b>            | 0.085400 |          |
| <b>Valor crítico de t (una cola)</b>  | 1.795884 |          |
| <b>P(T&lt;=t) dos colas</b>           | 0.170801 |          |
| <b>Valor crítico de t (dos colas)</b> | 2.200985 |          |

|                                       | <b>S</b> | <b>S</b> |
|---------------------------------------|----------|----------|
| <b>Media</b>                          | 0.577333 | 0.418333 |
| <b>Varianza</b>                       | 0.080451 | 0.759203 |
| <b>Observaciones</b>                  | 12       | 12       |
| <b>Estadístico t</b>                  | 0.571120 |          |
| <b>P(T&lt;=t) una cola</b>            | 0.289699 |          |
| <b>Valor crítico de t (una cola)</b>  | 1.795884 |          |
| <b>P(T&lt;=t) dos colas</b>           | 0.579399 |          |
| <b>Valor crítico de t (dos colas)</b> | 2.200985 |          |

|                                       | <b>P</b> | <b>P</b> |
|---------------------------------------|----------|----------|
| <b>Media</b>                          | 0.085    | 0.044416 |
| <b>Varianza</b>                       | 0.013089 | 0.002287 |
| <b>Observaciones</b>                  | 12       | 12       |
| <b>Estadístico t</b>                  | 1.006793 |          |
| <b>P(T&lt;=t) una cola</b>            | 0.167833 |          |
| <b>Valor crítico de t (una cola)</b>  | 1.795884 |          |
| <b>P(T&lt;=t) dos colas</b>           | 0.335667 |          |
| <b>Valor crítico de t (dos colas)</b> | 2.200985 |          |

|                                       | <b>Si</b> | <b>Si</b> |
|---------------------------------------|-----------|-----------|
| <b>Media</b>                          | 0.45      | 0.775916  |
| <b>Varianza</b>                       | 0.198550  | 2.650163  |
| <b>Observaciones</b>                  | 12        | 12        |
| <b>Estadístico t</b>                  | -0.616866 |           |
| <b>P(T&lt;=t) una cola</b>            | 0.274938  |           |
| <b>Valor crítico de t (una cola)</b>  | 1.795884  |           |
| <b>P(T&lt;=t) dos colas</b>           | 0.549877  |           |
| <b>Valor crítico de t (dos colas)</b> | 2.200985  |           |

