

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS

**EVALUACIÓN DE ELEMENTOS DE BIOABSORCIÓN PARA LA
REDUCCIÓN DE CONCENTRACIÓN AÉREA CONTAMINANTE EN
VÍAS URBANAS**

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

ELABORADO POR

JORGE YENSI URBANO CAMONES

ASESOR

MSc. EDWARD SANTA MARÍA DÁVILA

LIMA – PERÚ

2023

A mis padres

Por el gran esfuerzo y sacrificio que han hecho por mi superación.

A mis hermanas

Por su apoyo permanentemente, sobre todo en la parte emocional.

A mi asesor

Por brindarme su tiempo y su vasta experiencia.

A mi pueblo de Aija

Por ser fuente de inspiración y fortalecimiento.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, expreso mi agradecimiento a mi asesor de tesis, el M.Sc. Edward Santa María Dávila, por compartirme sus conocimientos y experiencia en la investigación, factores claves para culminar con éxito esta tesis. De igual manera, por darme la oportunidad de postular y tener éxito en el concurso de investigación por parte del Vicerrectorado de Investigación de la UNI.

También, mis infinitos agradecimientos a mi Co-asesor de tesis, el Mg. Marck Regalado Espinoza, por su seguimiento constante en todas las etapas de esta investigación, por la paciencia y la vasta retroalimentación en cada revisión interna que hemos tenido. Y no puedo pasar por alto el apoyo en la redacción del Paper que está relacionado a esta investigación de tesis.

Así mismo, agradezco a mi alma mater la Universidad Nacional de Ingeniería, que me brindó el conocimiento necesario para desarrollarme en mi carrera profesional, esto gracias a los docentes de calidad que me transmitieron sus conocimientos técnicos y las instrucciones para ser una mejor persona.

Además, agradecer a mis hermanas y mi madre por el enorme esfuerzo y sacrificio que hicieron por mí. Y a toda mi familia en general por ese apoyo incondicional que me han brindado en distintas circunstancias de la vida. Me llevo siempre presente sus consejos de vida.

De igual manera, quiero agradecer a mis compañeros que mi alma mater me ha permitido conocer, con quienes he compartido experiencias inolvidables tanto buenas como malas, pero que siempre se mantuvo esa unión y preocupación por los demás.

Finalmente, agradecer a mis amigos que he conocido fuera de la universidad, quienes me han demostrado el verdadero valor de la amistad, aquellos con quienes conviví en mi infancia y mi adolescencia. En especial a mi mejor amigo Steven que guía mi camino y a quien llevo siempre presente.

ÍNDICE

ÍNDICE	1
RESUMEN.....	3
ABSTRACT	4
PRÓLOGO	5
LISTA DE TABLAS	6
LISTA DE FIGURAS	7
LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS	10
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	12
1.1 GENERALIDADES	12
1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	12
1.2.1 Problema general	14
1.2.2 Problemas específicos.....	14
1.3 OBJETIVOS DEL ESTUDIO.....	14
1.3.1 Objetivo General.....	14
1.3.2 Objetivos Específicos	14
1.4 HIPÓTESIS	15
1.4.1 Hipótesis general.....	15
1.4.2 Hipótesis específicas	15
1.5 ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS	15
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL	19
2.1 SOSTENIBILIDAD.....	19
2.2 OBJETIVOS DEL DESARROLLO SOSTENIBLE	19
2.3 CIUDADES SOSTENIBLES	19
2.4 POLUCIÓN DEL AIRE.....	19
2.4.1 Óxidos de Nitrógeno (NOx)	20
2.4.2 Material particulado (PM).....	20
2.5 ESTÁNDARES DE CALIDAD AMBIENTAL (ECA) DEL AIRE	20
2.6 MUSGOS	20
2.7 METALES PESADOS.....	21
2.8 ESPECTROFOTOMETRÍA DE ABSORCIÓN ATÓMICA EN LLAMA ..	21
CAPÍTULO III: INFLUENCIA DE LA POLUCIÓN VIAL EN LA VEGETACIÓN ...	22
3.1 ZONAS DE ESTUDIO	22

3.2	FLUJOGRAMA DE TRABAJO	26
3.3	MEDICIÓN DE DIÁMETROS DE TRONCOS	27
3.4	ANÁLISIS CUALITATIVO DE LAS HOJAS	28
3.5	ANÁLISIS CUANTITATIVO DE LAS HOJAS	29
CAPÍTULO IV: CONSTRUCCIÓN DE MEDIDOR DE CALIDAD DEL AIRE.....		32
4.1	JUSTIFICACIÓN DEL USO DEL MUSGO.....	32
4.2	PRIMERA EXPLORACIÓN.....	33
4.3	PRIMERA EXPOSICIÓN DE MUSGOS.....	38
4.4	INICIO DE LA ADAPTACIÓN DE MOSSPHERAS	46
4.5	SEGUNDA EXPLORACIÓN	48
4.6	COLOCACIÓN DE MUESTRAS DE MUSGO EN ESFERAS	49
4.7	TERCERA EXPLORACIÓN	53
4.8	PRIMERA COLOCACIÓN DE SPHAGNUM MOSS EN ESFERAS	55
4.8.1	Esferas de musgo.....	55
4.8.2	Modalidad de riego	59
4.8.3	Aparatos electrónicos (cámara y sensor).....	59
4.9	MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE RIEGO	62
4.10	SEGUNDA COLOCACIÓN DE SPHAGNUM MOSS EN ESFERA	65
CAPÍTULO V: ANÁLISIS DE DATOS		70
5.1	CONDICIONES METEOROLÓGICAS.....	70
5.2	ESTUDIO DE TRÁFICO VEHICULAR.....	71
5.3	ANÁLISIS DE DATOS	73
5.3.1	Datos meteorológicos.....	73
5.3.2	Flujo vehicular	74
5.3.3	Metales pesados acumulados	75
5.3.4	Partículas retenidas por los ficus	84
5.3.5	Relación de datos.....	84
5.3.6	Explicación de resultados	87
5.4	COMPARATIVO DE COSTOS	88
CONCLUSIONES.....		91
RECOMENDACIONES.....		92
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		94

RESUMEN

Actualmente, se tiene un alto impacto negativo por la contaminación del aire, siendo uno de los focos contaminantes el parque automotor, debido a que algunas de sus emisiones son metales pesados, altamente dañinos para el ser humano. En ese sentido, se vienen generando proyectos de mitigación mediante sistemas o dispositivos electrónicos que permitan su medición. Sin embargo, también se pueden emplear elementos orgánicos para dicho fin (conocidos como "biomonitores"), tal es el fundamento de esta investigación cuyo insumo principal es el musgo (especie *Sphagnum Moss*), cuya función es la de monitorizar la concentración de metales pesados en el medio ambiente. Este dispositivo es de bajo costo, tiene 14 centímetros de diámetro y es expuesto a una altura promedio de 3.50 metros. Como parte del análisis de funcionalidad, se instalaron una serie de estos dispositivos y fueron expuestos en diferentes puntos de la ciudad de Lima donde se tienen altos índices de tráfico vehicular, durante un periodo de un mes para encontrar diferencias en la concentración de los metales pesados: arsénico, cadmio, cobre, cobalto, cromo, níquel, plomo y zinc. Como parte de la toma de datos, es necesario acompañar a estos dispositivos con un dispositivo electrónico que mida la concentración en tiempo real del CO₂, temperatura y humedad, además de una cámara que registre el tráfico vehicular para su posterior conteo vehicular.

Luego del periodo de exposición, las muestras de musgo se llevaron a un laboratorio para que se realice el ensayo "Flame Atomic Absorption Spectrophoto" para medir la concentración de metales pesados que ha adquirido el dispositivo durante el periodo de exposición, y será comparado con los resultados de la concentración inicial que tuvieron los musgos.

Se logra identificar que el dispositivo sí ha captado metales pesados en este periodo, por lo que se validaría su uso como biomonitor. Por otro lado, al analizar una relación numérica de las concentraciones según la cuantificación del tránsito vehicular en cada zona, se pudo identificar una mejor correlación con el metal plomo (Pb), lo cual no solo se debería a su posible presencia en el combustible empleado por los vehículos (lo cual ya no es permitido en la actualidad), sino que persiste en el ambiente por su uso histórico, su falta de degradación y su baja movilidad. Asimismo, el plomo también por el desgaste de los frenos, el desgaste de los neumáticos y el uso del aceite del motor.

ABSTRACT

Currently, there is a high negative impact due to air pollution, one of the polluting sources being the automobile fleet, due to the fact that some of its emissions are heavy metals, highly harmful to human beings. In that, mitigation projects are being developed through electronic systems or devices that allow their sense of measurement. However, organic elements can also be used for this purpose (known as "biomonitors"), such is the basis of this research whose main input is moss (*Sphagnum Moss species*), whose function is to monitor the concentration of heavy metals in the environment. This device is inexpensive, has a diameter of 14 centimeters and is exposed to an average height of 3.50 meters. As part of the functionality analysis, a series of these devices were installed and exposed in different parts of the city of Lima where there are high rates of vehicular traffic, for a period of one month to find differences in the concentration of heavy metals: arsenic, cadmium, copper, cobalt, chromium, nickel, lead and zinc. As part of the data collection, it is necessary to accompany these devices with an electronic device that measures the real-time concentration of CO₂, temperature and humidity, as well as a camera that records vehicular traffic for subsequent vehicular counting.

After the exposure period, the moss samples were taken to a laboratory for the "Flame Atomic Absorption Spectrophoto" test to measure the concentration of heavy metals that the device has acquired during the exposure period and will be compared. with the results of the initial concentration that the mosses had.

It is possible to identify that the device has captured heavy metals in this period, so its use as a biomonitor would be validated. On the other hand, when analyzing a numerical relationship of the concentrations according to the quantification of vehicular traffic in each area, a better relationship with the metal lead (Pb) could be identified, which is not only due to its possible presence in the fuel used. by vehicles (which is no longer allowed today) but persists in the environment due to its historical use, its lack of degradation and its low mobility. Likewise, lead is also caused by brake wear, tire wear and the use of motor oil.

PRÓLOGO

El parque automotor envejecido y con controles deficitarios de emisiones atmosféricas, ha creado una condición de alta contaminación del aire urbano, que es observable a simple vista. La presente investigación se ha desarrollado a partir de una preocupación de los jóvenes estudiantes de la UNI FIC, debido a la proximidad de la congestionada Av. Túpac Amaru, y a la observación y a la constatación de la degradación de las áreas verdes en las zonas de paraderos y de las avenidas. Las especies vegetales dentro del área de influencia de las zonas congestionadas de vehículos están llenas del polvo gris producto de la pobre combustión de los recursos energéticos fósiles, además, es notorio que las plantas tienen menos color, los troncos, ramas y hojas se observan débiles y enfermas. ¿Por qué las plantas generarían tanta preocupación a la comunidad estudiantil? Porque son el pulmón purificador de la ciudad, y si no tienen plena capacidad de renovación del aire y de oxigenación, la polución atmosférica también tendrá efectos nocivos sobre los ciudadanos de las calles próximas o que se transportan todos los días, entre ellos, los mismos estudiantes.

¿Es posible medir el impacto de la contaminación vial sobre las plantas? ¿las plantas pueden conservar las huellas de la contaminación dentro de su composición química y biológica? ¿pueden diseñarse dispositivos biológicos capaces de observar eficazmente los efectos de la polución atmosféricas de metales pesados que puedan afectar la salud? La intuición y el entusiasmo de Jorge Yensi Urbano han permitido experimentar con musgos como dispositivos de bioabsorción de calidad de aire en zonas urbanas. El trabajo de investigación ha conllevado a una búsqueda extensa de musgos en lechos naturales de ríos, y también con productores de musgo para exportación, luego de varios viajes y muchos ensayos, pruebas y errores, de sistemas de hidratación de los musgos, y varios dispositivos corregidos, pudieron tomarse mediciones apropiadas y que pudieron corroborarse con análisis químicos de laboratorio.

También debo agradecer al Ing. Marck Regalado, un joven profesor universitario e investigador dedicado, preocupado por los aspectos de sostenibilidad de la construcción y del transporte, quien ha colaborado con este proyecto en todas sus etapas, proponiendo diferentes alternativas de análisis y procesamiento de información.

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Comparativo de diámetro entre ficus.....	28
Tabla 2. Registro de la concentración de partículas.....	30
Tabla 3. Gotas por Litro.....	45
Tabla 4. Segundo en hora.....	45
Tabla 5. Concentraciones Iniciales de musgo.....	58
Tabla 6. Hoja de reporte emitido por el Sensor Electrónico.....	70
Tabla 7. Registro de tráfico vehicular – Estación 03, 10/05/2022.....	72
Tabla 8. Registro de tráfico vehicular – Estación 03, 10/05/2022.....	72
Tabla 9. Datos meteorológicos medidos.....	73
Tabla 10. Datos meteorológicos definitivos.....	73
Tabla 11. Flujo vehicular.....	74
Tabla 12. Consumo de Combustible de vehiculos y su normalización.....	75
Tabla 13. Cantidad de vehículos normalizados.....	75
Tabla 14. Concentración de metales pesados por estación (mg/kg).....	76
Tabla 15. Metales pesados acumulados (Mes 1 - Mes 0).....	82
Tabla 16. Concentración normalizada de concentración de metales pesados... ..	82
Tabla 17. Información de ficus expuestos.....	84
Tabla 18. Datos recopilados a relacionar.....	84
Tabla 19. Correlación del primer conjunto de datos.....	85
Tabla 20. Correlación del segundo conjunto de datos.....	86
Tabla 21. Identificación de la correlación de datos – primer conjunto de datos.....	86
Tabla 22. Identificación de correlación de datos – segundo conjunto de datos... ..	87
Tabla 23. Costo de componentes.....	88
Tabla 24. Costo de equipos de medición.....	89

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa del Perú, ubicación de sectores de la investigación.	22
Figura 2. Mapa de Lima Metropolitana, sectores ubicados en el Rímac.	23
Figura 3. Ubicación, Puerta N°04 - UNI.	23
Figura 4. Muestra de hojas de ficus. Puerta N°04 – UNI.	24
Figura 5. Ubicación FIC-UNI.	24
Figura 6. Ubicación Huarney, Ancash.	25
Figura 7. En la parte derecha, se puede ver el árbol a analizar.	25
Figura 8. Flujograma guía.	26
Figura 9. Algunos de los análisis del ficus.	27
Figura 10. Distancia aproximada entre la Puerta N°04 de la UNI y la FIC UNI. ...	28
Figura 11. En la izquierda, hojas de la zona con poco tráfico vehicular, a la derecha, hojas de la zona con alto tráfico vehicular.	29
Figura 12. Medición de las áreas de las hojas en papel milimétrico.	30
Figura 13. Comparativa de concentraciones de partículas en hojas.	31
Figura 14. Mapa departamental de Ancash, puntos de extracción.	33
Figura 15. Primer punto de extracción.	34
Figura 16. Catarata del punto de extracción.	35
Figura 17 Muestra extraída, con su pesaje respectivo.	35
Figura 18. Segundo punto de extracción.	36
Figura 19. Acequia del punto de extracción, con su pesaje respectivo.	36
Figura 20. Tercer punto de extracción.	37
Figura 21. Catarata del punto de extracción.	37
Figura 22. Muestra extraída con su pesaje respectivo.	37
Figura 23. Muestras en recipiente de traslado.	38
Figura 24. Repisa donde se colocaron las muestras.	39
Figura 25. Colocación y codificación de muestras.	40
Figura 26. Cambios significativos de las muestras.	41
Figura 27. Accesorio para el riego por goteo y manguera de 1/2"	42
Figura 28. Cabezales en cada vasija con muestras de musgo.	43
Figura 29. Sistema de Riego, abastecedor de agua (botella de 3 litros).	43
Figura 30. Problemas con los musgos.	44
Figura 31. Nuevo sistema de goteo.	46
Figura 32. Dirección del viento en 2D.	47
Figura 33. Pequeña catarata con presencia de Leskea Polycarpa.	48

Figura 34. Muestra extraída.....	48
Figura 35. Equipo de Venocllisis.....	49
Figura 36. Colocación de tecnopor en coladores.....	50
Figura 37. Musgo colocado en todo el contorno.....	50
Figura 38. Esfera lista para ser expuesta.....	51
Figura 39. Sistema instalado.....	51
Figura 40. Obstaculización en el filtro.....	52
Figura 41. Muestras de musgo secas al 18 de noviembre del 2020.....	53
Figura 42. Hoja seca de la muestra de la esfera al 18 de noviembre del 2020...53	
Figura 43. Hábitat del Sphagnum Moss, comunidad campesina de Jauja.....	54
Figura 44. Sphagnum Moss recién extraída de su hábitat natural.....	55
Figura 45. Colocación de musgo y esfera de Tecnopor.....	55
Figura 46. Dispositivos codificados para la Estación 001, Puerta N°4 – UNI.....	56
Figura 47. Distribución de estaciones en Lima Metropolitana.....	57
Figura 48. Riego manual, Estación N°03.....	59
Figura 49. Sensor y cámara instalados, Estación N°04.....	59
Figura 50. Sensor electrónico para medir CO, humedad y temperatura.....	60
Figura 51. La cámara de la Estación 04, conectada al cargador portátil.....	60
Figura 52. La cámara y el sensor alimentados por la batería portátil.....	61
Figura 53. Recipiente que abastece de agua al Sistema de Riego.....	62
Figura 54. Dispositivos húmedos para gotas cada 4 segundos.....	63
Figura 55. Dispositivos húmedos para gotas cada 7 segundos.....	63
Figura 56. Corona de manguera con orificios para salida de agua.....	64
Figura 57. Prueba de cómo se distribuirá la corona dentro de la esfera.....	64
Figura 58. Mondadientes incrustados diametralmente opuestos.....	65
Figura 59. Estación N°01.....	67
Figura 60. Estación N°02.....	67
Figura 61. Estación N°03.....	68
Figura 62. Estación N°04.....	68
Figura 63. Estación N°05.....	69
Figura 64. Grabación del tráfico vehicular - Estación 04, 28/04/2021.....	71
Figura 65. Tipología de Vehículos.....	71
Figura 66. Gráfica de concentraciones del arsénico.....	77
Figura 67. Gráfica de concentraciones del cadmio.....	78
Figura 68. Gráfica de concentraciones del cobre.....	79

Figura 69. Gráfica de concentraciones del cobalto.....	79
Figura 70. Gráfica de concentraciones del cromo.....	80
Figura 71. Gráfica de concentraciones del níquel.....	80
Figura 72. Gráfica de concentraciones del plomo.....	81
Figura 73. Gráfica de concentraciones del zinc.....	81
Figura 74. Concentraciones mayores y menores de los metales pesados.	83
Figura 75. Concentración del Pb vs Flujo normalizado.	88

LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS

Ag	: Plata
Al	: Aluminio
As	: Arsénico
Au	: Oro
Ba	: Bario
Be	: Berilio
Cd	: Cadmio
Co	: Cobalto
CO	: Monóxido de Carbono
CO ₂	: Dióxido de Carbono
Cr	: Cromo
Cu	: Cobre
ECA	: Estándares de Calidad del Aire
Fe	: Hierro
FIC	: Facultad de Ingeniería Civil
Hg	: Mercurio
INEI	: Instituto Nacional de Estadística e Informática
MINAM	: Ministerio del Ambiente
Mn	: Manganeso
Mo	: Molibdeno
Ni	: Niquela
NO _x	: Óxidos de Nitrógeno
OMS	: Organización Mundial de la Salud
ONU	: Organización de las Naciones Unidas
PAH	: Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos
Pb	: Plomo
PBI	: Producto Bruto Interno
PM	: Material particulado
PM _{0.1}	: Material particulado: diámetros menores a 0.1 micrómetros
PM ₁₀	: Material particulado: diámetros menores a 10 micrómetros
PM _{2.5}	: Material particulado: diámetros menores a 2.5 micrómetros
REMCA	: Red de Monitoreo Automático de la Calidad del Aire
Se	: Selenio

Sn	: Estaño
Tl	: Talio
UNI	: Universidad Nacional de Ingeniería
UNMSM	: Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Va	: Vanadio
Zn	: Zinc

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1 GENERALIDADES

Debido al alto impacto negativo que está generando la contaminación del aire a nivel global tanto en el medio ambiente como en la salud de los seres humanos, si bien es cierto, las estrategias y tecnologías para reducir dicho impacto aún son débiles y considerados de poca importancia, empero hay organizaciones y gobiernos que están implementando estrategias y tecnologías para reducir dicho impacto. Todo ello dirigiéndose así al objetivo 13 de Desarrollo Sostenible: Acción por el clima, el cual requiere adoptar medidas para combatir el cambio climático y sus efectos (Organización de las Naciones Unidas [ONU], 2015). Así también, cumplir con el Acuerdo de París cuyo fundamento es evitar que el incremento de la temperatura media global supere los 2°C (The Paris Agreement, 2015).

1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

En los últimos años, se ha tratado la problemática de las altas cifras de contaminación a nivel mundial, cuyos efectos graves no solo repercuten a la naturaleza, sino también a los seres humanos. Se estima que la cuarta parte de las muertes y enfermedades prematuras que se producen en la actualidad es debido a la contaminación antropogénica (ONU, 2019).

Respecto a la polución del aire mundial, la OMS menciona que el 92% de la población vive en lugares contaminados; además, estima que cerca de siete millones de personas mueren cada año por la exposición a las partículas finas contenidas en el aire contaminado, las cuales penetran profundamente en los pulmones y el sistema cardiovascular, y provocan enfermedades como accidentes cerebrovasculares, cardiopatías, cáncer de pulmón, neumopatía obstructiva crónica e infecciones respiratorias, por ejemplo, neumonía (Organización Mundial de la Salud [OMS], 2018).

Por otro lado, se estima que algunos países en desarrollo deben realizar inversiones en infraestructura sostenible, equivalente a un 4.5% de su PBI en promedio, con los cuales se pretende alcanzar objetivos de desarrollo sostenible relacionados con la infraestructura y contribuir con la reducción del calentamiento global (Chávarri & Falen, 2020).

Tal como declara la ONU para la contaminación en general, “La incapacidad constante para adoptar medidas urgentes está teniendo repercusiones negativas sostenidas y potencialmente irreversibles sobre los recursos ambientales esenciales y la salud humana” (ONU, 2019).

En definitiva, el Perú no escapa de esta problemática y sobre todo de sus consecuencias ya que, en los reportes actualizados por la OMS del año 2019, Perú es el país más contaminado en Latinoamérica y se encuentra en el puesto trigésimo tercero a nivel mundial. En cuanto a su capital Lima, es la segunda ciudad más contaminada en Latinoamérica después de Santiago de Chile (OMS, 2019).

Si bien es cierto que en los informes técnicos de estadísticas ambientales del INEI que describen cuantitativamente la calidad del aire en la ciudad, algunas zonas reportan datos que no superan los límites de los Estándares de Calidad del Aire (ECA), es necesario tomar en cuenta que existen avenidas con niveles de tráfico muy altos, donde concurren vehículos deficientes y que emplean combustibles de baja calidad que generan una alta concentración de partículas contaminantes. Esta realidad no ha cambiado tanto desde el 2001, cuando se presentaban reportes en la Av. Abancay con datos que eran mayores al doble de los ECA vigentes, y progresivamente se puede ver los reportes mensuales desde ese año (Instituto Nacional de Estadística e Informática [INEI], 2004).

En Lima, el 70% de la contaminación del aire es causada por el parque vehicular. Se debe mencionar también que las vías con pistas desgastadas no sólo provocan alteraciones en el aumento del polvo suspendido, sino que también provocan el desgaste de los neumáticos porque aumenta la resistencia a la rodadura de los vehículos. Este problema se ve constantemente en muchas de las calles de Lima (Chávarri & Falen, 2020).

A su vez, para los efectos de la salud en Lima, se ha comprobado que la exposición crónica al aire ambiental contaminado por partículas resulta en enfermedades crónicas, sobre todo cardiovasculares, cerebrovasculares, y pulmonares, incluyendo cáncer del pulmón y enfermedades pulmonares no

malignas. Como ejemplo, en el 2014 se registró que 2,300 muertes prematuras fueron atribuibles a este problema (Gonzales et al., 2014).

Entonces, después de todo lo expuesto, se reconocen las consecuencias de la contaminación del aire en los seres humanos, especialmente las enfermedades respiratorias. En Lima, el problema se agrava por el efecto del parque automotor denso, como ocurre sobre todo en el centro de la ciudad. En cuanto a la tecnología, no se tiene un buen avance para mitigar el efecto de dicha contaminación, y los pocos esfuerzos realizados son independientes de cada distrito que adopta dicha iniciativa.

1.2.1 Problema general

Se identifica la problemática que da origen a la investigación:

¿Cómo biomonitorizar la contaminación del aire en la etapa de operación en las vías de las principales calles de Lima Metropolitana?

1.2.2 Problemas específicos

- ¿Cómo influye la contaminación vial en la vegetación, en las principales calles de Lima metropolitana?
- ¿En qué medida influye el periodo de exposición de un dispositivo biomonitorizador respecto a las vías de tránsito vehicular?
- ¿En qué medida influye la meteorología a la capacidad de absorción de contaminantes del dispositivo?
- ¿En qué medida influye el tráfico vehicular en la concentración de contaminantes en el aire?

1.3 OBJETIVOS DEL ESTUDIO

1.3.1 Objetivo General

Proponer un dispositivo biológico de bajo costo en base a vegetación nativa y de fácil instalación, para medir la concentración de contaminantes del aire en zonas urbanas en las principales vías de Lima metropolitana.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Analizar el efecto que tienen las plantas hacia la concentración de contaminantes en lugares de alto tráfico vehicular.

- Evaluar la concentración de contaminantes del aire a partir de periodos de exposición estandarizados mensualmente.
- Encontrar la relación existente entre los parámetros meteorológicos y la capacidad de absorción de contaminantes de parte del dispositivo.
- Realizar el estudio de tráfico vehicular que permita encontrar una relación con la concentración de contaminantes en el aire.

1.4 HIPÓTESIS

1.4.1 Hipótesis general

Los dispositivos biológicos capturan la polución atmosférica, variando su concentración de acuerdo con el tráfico vehicular y a la distancia de la fuente.

1.4.2 Hipótesis específicas

- Existen brechas significativas en cuanto al aspecto físico y biológico, entre plantas expuestas a áreas con alta concentración de contaminantes, y plantas expuestas a áreas de baja contaminación ambiental.
- La relación de periodo de exposición es directamente proporcional a la concentración de contaminantes captados.
- Los parámetros meteorológicos de acuerdo con la estación del año y la ubicación alteran en ciertos periodos de tiempo la capacidad de absorción del dispositivo.
- A medida que aumenta el tráfico vehicular, aumenta la concentración de contaminantes, y esto influye más según la tipología vehicular, por su capacidad de emisión de contaminantes.

1.5 ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

En Europa, por ejemplo, existen múltiples proyectos como EUROCHAMP, proyecto de investigación de cámaras de simulación atmosféricas con el fin de establecer bases para modelos climáticos y de calidad del aire. El proyecto "Beneficios del Espacio Verde Urbano" (BUGS), proyecto de investigación de la Unión Europea cuyo objetivo es desarrollar una metodología para evaluar el impacto de los espacios verdes y formular recomendaciones sobre su uso como herramienta de diseño en la planificación urbana. También, PROGREENCITY, proyecto cuyo objetivo es estudiar y difundir la bonanza de los recubrimientos vegetales en las fachadas y azoteas de los edificios, para ver si esta tecnología

es capaz de mitigar los problemas actuales del medio ambiente urbano respecto a la calidad del aire. Estos acuerdos amplían el estado del conocimiento sobre la contaminación del aire y ofrecen enfoques para nuevas soluciones (Splittgerber & Saenger, 2015).

Entendiendo ya un poco de algunos de los proyectos que se vienen realizando y de las inversiones con fines sostenibles. Uno de los tantos estudios y aplicaciones que han tenido en común algunos países como Alemania y España, en pro de la sostenibilidad, combatiendo la polución del aire, es la de los musgos, por su buena capacidad de bioadsorción y su facilidad de implementación. Como resultado de algunas pruebas de laboratorio realizadas en la Universidad de Bonn, los biólogos, expertos en musgos, encontraron que es excelente en la fijación de contaminantes como el polvo fino. Debido a sus características fisiológicas específicas, este es estrictamente diferente a las plantas con flores, no tiene un sistema de circulación distintivo para transportar agua y nutrientes del suelo a todas las partes de la planta. Como resultado, el musgo necesita reunir los nutrientes necesarios del aire; por eso, se les llama "intercambiador de cationes". Las superficies de los musgos poseen la capacidad de carga electrostática. Al contrario, el polvo fino y los compuestos de óxido de nitrógeno tienen una carga negativa. Como resultado, surgen fuerzas de atracción y delimitación que permiten que el musgo acumule las sustancias e incluso absorben el polvo a través de sus hojas y lo digieren, de esta manera convirtiéndolo en fitomasa (Splittgerber & Saenger, 2015).

Es así como se debe mencionar la técnica de la bolsa de musgo, técnica que se viene desarrollando desde el año 1971, usada especialmente cuando los estudios de biomonitorio con musgos in situ son difíciles en áreas urbanas donde estos organismos son escasos o ausentes. La bolsa de musgo se volvió muy popular debido a sus ventajas destacadas sobre el muestreo de precipitación convencional y el biomonitorio in situ para estudios de deposición atmosférica. Esta técnica puede ofrecer tanto un bajo costo como una alta eficiencia en comparación de recolectores pasivos, como los frascos de caída de polvo o los muestreadores a granel. Además, las ventajas de las bolsas de musgo sobre el muestreo de vegetación son la uniformidad de la superficie del receptor y el periodo de exposición, la flexibilidad de selección de sitio, y muchos más (Sun et al., 2009).

Como un mejoramiento de la técnica anterior, el consorcio Mossclone, conformado por investigadores de cinco universidades (se menciona a algunos, Universidad Albert-Ludwig de Friburgo de Alemania, Siena de Italia; La Coruña y Santiago de Compostela de España) y cinco empresas de siete países europeos, ha desarrollado el primer instrumento biotecnológico que permite monitorizar con un musgo los niveles de contaminación del aire. Se trata de una esfera con esta vegetación, que permite monitorizar los niveles de contaminación del aire, colocadas al aire libre. Tras un periodo de exposición adecuado, se lleva al laboratorio para que este musgo pueda ser analizado, obteniendo la concentración de contaminantes tales como Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (PAH) y metales pesados. Este dispositivo se ha ensayado con bastante éxito en varias experiencias piloto desarrolladas en tres países europeos, entre ellos España, en ubicaciones urbanas, industriales y rurales. Un objetivo a mediano plazo es establecer redes de vigilancia atmosférica a escalas regional, nacional e incluso europea, con las que se pueda estandarizar los procedimientos en todo el continente. De esta manera, los resultados serían completamente comparables y se podrían generar mapas de calidad del aire más fiables que los actuales y, así, detectar focos potenciales de contaminación (Universidad de la Rioja, 2015).

En el caso del Perú, debido a la poca inversión en producción científica, si bien no se tienen investigaciones sofisticadas como las europeas mencionadas, se puede resaltar la Red de Módulos de Monitoreo de calidad del aire, llevadas a cabo por la Municipalidad Metropolitana de Lima. Dicha red está basada en el método alternativo de medición de sensores de bajo costo, con el objetivo de brindar los canales de acceso a la información en materia de calidad del aire y empoderar a los ciudadanos de Lima, permitiéndoles conocer el estado de la calidad del aire que respiran en tiempo real (Municipalidad Metropolitana de Lima, 2021). Una buena iniciativa considerando que el MINAM (Ministerio del Ambiente) a finales del 2019 publicó un Diagnóstico de la calidad del aire de Lima y Callao, donde informa que las fuentes móviles derivadas del parque automotor fueron la mayor causa de material particulado en el ambiente. Dichas emisiones de material particulado están principalmente relacionadas con la combustión de vehículos de las categorías ómnibus, remolcador y camión a diésel, y con vehículos de 14 años o más antigüedad (Ministerio del Ambiente [MINAM], 2019).

En el caso de la ciudad de Lima, en el 2009, se realizó un monitoreo ambiental utilizando los biomonitores con plantas *Usnea* sp. y *Tillandsia capillaris*. Estas fueron recogidas de una zona no contaminada y expuestas en pequeñas bolsas de tul de malla 12, por un periodo de tres meses en diferentes puntos de muestreo de la ciudad. Luego, fueron colectados, preparados y analizados utilizando la técnica de análisis por activación neutrónica. Dicho sea de paso, mencionar que los resultados obtenidos mostraron contaminación significativa en algunas zonas de la ciudad (las de mayor concentración en la Av. Túpac Amaru, Comas; Prolongación Cangallo, La Victoria; y en el distrito de Lurigancho), procedentes de las emisiones vehiculares y la actividad industrial (Bedregal et al., 2019).

Entonces, analizando todo lo explicado, se tiene como desafío adaptar esta tecnología con musgos nativos del Perú, o lo que es más preciso, musgos que se adapten al clima de la ciudad de Lima. Además, se deben evaluar variables que tengan como objetivo reducir significativamente el costo de una tecnología similar. Por último, evaluar su implementación optimizada en las vías con alta contaminación en la ciudad de Lima. Alineándose de esta manera con una de las metas del Objetivo 13 de Desarrollo Sostenible, la cual es mejorar la educación, la sensibilización y la capacidad humana e institucional respecto de la mitigación del cambio climático, la adaptación a él, la reducción de sus efectos y la alerta temprana (ONU, 2015).

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

Para iniciar la investigación, se debe tener en claro los siguientes conceptos.

2.1 SOSTENIBILIDAD

Se trata de la satisfacción de las necesidades actuales sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras de satisfacer las suyas, de esta manera garantizando el equilibrio entre crecimiento económico, cuidado del medio ambiente y bienestar social (Brundtland, 1987).

2.2 OBJETIVOS DEL DESARROLLO SOSTENIBLE

También conocido como Objetivos Mundiales, son una serie de medidas adoptadas por los Estados Miembros de la ONU en el año 2015 como llamado universal para poner fin a la pobreza, proteger el planeta y garantizar que todas las personas gocen de paz y prosperidad. De esta manera, se plantearon 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible con 169 metas de carácter integrado e indivisible (Asamblea General de las Naciones Unidas, 2015).

Dentro del enfoque de la presente tesis, se puede mencionar el objetivo 11: "Conseguir que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles". Y el objetivo 13: "Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos".

2.3 CIUDADES SOSTENIBLES

Es aquella ciudad que ofrece una calidad de vida a sus habitantes sin poner en riesgo los recursos, vela por el bienestar de la humanidad futura y procura justicia social. Se debe tener principios de eficiencia energética y sostenibilidad que consigan el equilibrio entre el entorno y los recursos naturales. Para finalizar, mencionar que un punto fundamental son los ciudadanos y sus hábitos de comportamiento consciente hacia el bienestar común.

2.4 POLUCIÓN DEL AIRE

Se trata de la presencia de sustancias en el aire, las cuales tienen efectos negativos no solo en los seres humanos, sino también en animales y plantas, por el mismo hecho que la calidad del aire se reduce.

A continuación, se presentan algunos contaminantes relacionados a esta investigación:

2.4.1 Óxidos de Nitrógeno (NO_x)

Gases que se emiten principalmente en los procesos de combustión y tienen relación con el tráfico automotriz, así como instalaciones industriales de alta temperatura y de generación eléctrica. Su formación se da con la oxidación del nitrógeno atmosférico, la cual es el principal componente del aire (Paredes, 2010).

2.4.2 Material particulado (PM)

Mezcla de partículas sólidas y gotas líquidas que se encuentran suspendidas en el aire, se consideran desde el hollín hasta partículas que solo se pueden ver mediante un microscopio electrónico. Entonces, por ser tan pequeños, estas partículas pueden inhalarse y provocar graves problemas de salud (cáncer al pulmón, bronquitis, enfisema), debido a que pueden llegar a la profundidad de los pulmones, e incluso llegar al torrente sanguíneo (Arciniégas, 2012).

De acuerdo con el diámetro, estas se clasifican en PM₁₀ (diámetros menores a 10 micrómetros), PM_{2.5} (diámetros menores a 2.5 micrómetros) y PM_{0.1} (diámetros menores a 0.1 micrómetros). Sus efectos se diferencian precisamente por el alcance debido al tamaño que tienen.

2.5 ESTÁNDARES DE CALIDAD AMBIENTAL (ECA) DEL AIRE

Se trata de los valores máximos permisibles de concentración de contaminantes en el aire. Y así como se explica en el DS 003-2017-MINAM, son un referente obligatorio para el diseño y aplicación de los instrumentos de gestión ambiental. Desde aquí, se caracterizan las emisiones de las actividades productivas, extractivas y de servicios (MINAM, 2017).

Se debe considerar que la última actualización de los ECA del aire se ha dado en el año 2017 mediante el Decreto Supremo mencionado líneas arriba.

2.6 MUSGOS

Los musgos son plantas no vasculares briófitas. No vasculares, pues no tienen xilemas ni floemas que les permitan distribuir agua y nutrientes por su estructura, en su lugar captan sus nutrientes por medio de su propia superficie; en cuanto a sus raíces, solo les sirve para fijarse al suelo. Briófitas, porque son plantas de pequeño tamaño, que tienden a extenderse a lo largo de superficies. Si bien es cierto, los musgos pueden encontrarse en todo tipo de climas, la mayoría de los

musgos se presentan en sitios húmedos y sombreados dentro de los climas templados (Splittgerber & Saenger, 2015).

2.7 METALES PESADOS

Según la tabla periódica, es un elemento químico con alta densidad (mayor a 4 g/cm³), masa y peso atómico por encima de 20, y son tóxicos en concentraciones bajas. Algunos de estos elementos son: aluminio (Al), bario (Ba), berilio (Be), cobalto (Co), cobre (Cu), estaño (Sn), hierro (Fe), manganeso (Mn), cadmio (Cd), mercurio (Hg), plomo (Pb), arsénico (As), cromo (Cr), molibdeno (Mo), níquel (Ni), plata (Ag), selenio (Se), talio (Tl), vanadio (Va), oro (Au) y zinc (Zn).

2.8 ESPECTROFOTOMETRÍA DE ABSORCIÓN ATÓMICA EN LLAMA

Es una técnica muy común para detectar metales y metaloides en muestras ambientales. Es muy fiable y fácil de usar.

Ocurre cuando una muestra líquida se introduce en una llama. La llama sirve como un "soporte de muestra", cuando la luz pasa a través de los átomos y la llama simultáneamente, se calcula la absorbancia de la luz. La lámpara de cátodo hueco es una excelente fuente de línea brillante para la mayoría de los elementos determinables por absorción atómica. Se suministra luz de la longitud de onda adecuada y la cantidad de luz absorbida se puede medir frente a una curva estándar (New Jersey Institute of Technology, 2017).

CAPÍTULO III: INFLUENCIA DE LA POLUCIÓN VIAL EN LA VEGETACIÓN

Como etapa inicial, se enfocó en el análisis del efecto del tráfico vehicular hacia la calidad de aire. Una de las maneras más acertadas para esta investigación fue mediante la vegetación existente en las vías. Por ello, se planteó la siguiente interrogante: ¿Como identificar los efectos del tráfico vehicular en el estado de la vegetación aledaña?

Para dar respuesta a esta interrogante, se analizó cualitativa y cuantitativamente las plantas en zonas de alto tráfico vehicular, comparándolas con plantas donde existía tráfico vehicular casi nulo.

3.1 ZONAS DE ESTUDIO

La población analizada fueron las plantas en las zonas urbanas que están cercanos a vías con alto tráfico vehicular, distribuidos en tres sectores entre el departamento de Lima y el departamento de Ancash (ver figura 1).



Figura 1. Mapa del Perú, ubicación de sectores de la investigación.

Fuente: Elaboración propia.

Los sectores en Lima están ubicados exactamente en el distrito de Rimac (ver figura 2), en la Universidad Nacional de Ingeniería.

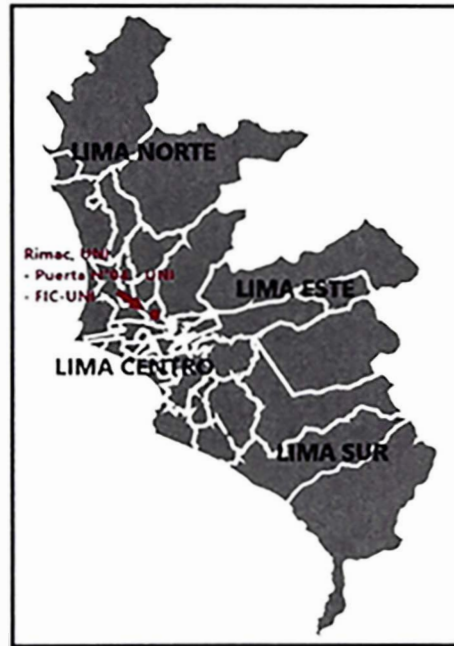


Figura 2. Mapa de Lima Metropolitana, sectores ubicados en el Rímac.
Fuente: Elaboración propia.

Estos 02 sectores están aparentemente cercanos, sin embargo, la diferencia es la proximidad en metros a las vías de la Av. Túpac Amaru. Es por ello que se detalla la ubicación de cada sector:

- Cruce de la Av. Eduardo de Habich con la Av. Túpac Amaru (Puerta 4 - UNI).
A 02 metros de las vías de la Av. Túpac Amaru.

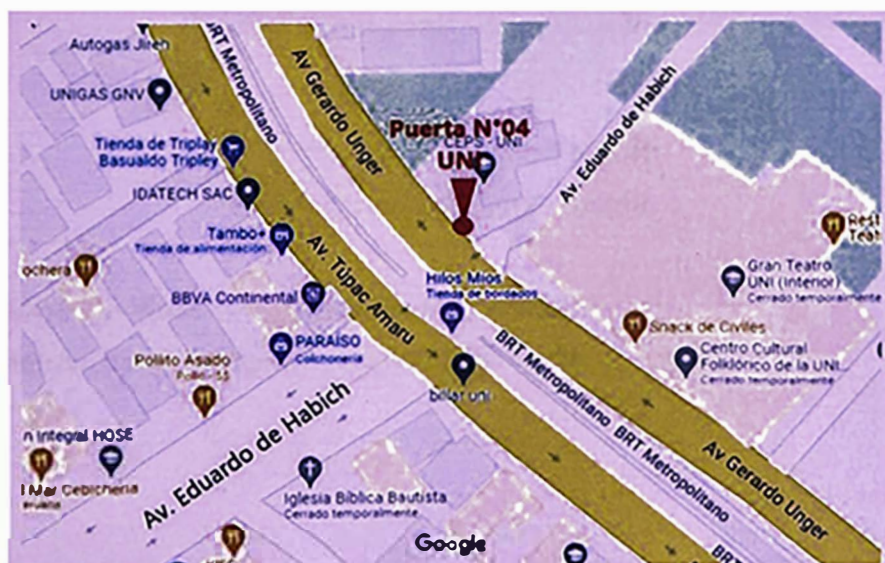


Figura 3. Ubicación, Puerta N°04 - UNI.

Elaboración: Fuente propia.



Figura 4. Muestra de hojas de ficus. Puerta N°04 – UNI

Elaboración: Fuente propia.

- Campus Universitario de la Universidad Nacional de Ingeniería (FIC - UNI).
A 120 metros de las vías de la Av. Túpac Amaru.



Figura 5. Ubicación FIC-UNI

Elaboración: Fuente propia.

- Panamericana Norte Km 295 (Huarmey, Ancash).
A 03 metros de la vía de la Panamericana Norte.



Figura 6. Ubicación Huarney, Ancash
Fuente: Elaboración propia.



Figura 7. En la parte derecha, se puede ver el árbol a analizar.
Fuente: Elaboración propia.

Los sectores fueron escogidos por cumplir con las especificaciones básicas, las cuales tenían que ser zonas tanto cercanas (Distancias máximas de 5 metros de la vía: Puerta N°04 UNI y Panam. Norte Km 295), como lejanas (Distancias a partir de los 10 metros: FIC UNI) al tránsito fluido, pero todos con similares condiciones para que se haga posible la comparación. Es decir, estar dentro del área de influencia de vías con tráfico vehicular denso.

Tener en cuenta que dichas zonas tenían presencia considerable de vegetación, en especial el ficus, además de facilidad de acceso para las tomas de datos correspondientes.

3.2 FLUJOGRAMA DE TRABAJO

Para mantener en orden esta etapa, se planificó mediante un flujograma guía (ver figura 8) tanto para la toma de datos como para el procesamiento, de la manera siguiente:



Figura 8. Flujograma guía.

Fuente: Elaboración propia.

La toma de datos se inició en los lugares mencionados anteriormente durante las fechas del 20 de setiembre al 27 de setiembre del 2020. Primero, se registraron las características de las plantas, tales como el diámetro del tronco, las dimensiones de las hojas, así como la extracción de muestras para la posterior medida de su peso. De igual manera, se registró la coloración de las hojas y el aspecto del árbol en general. Por último, se midieron las distancias aproximadas de las plantas analizadas a la vía concurrente de vehículos (ver figura 9).



Figura 9. Algunos de los análisis del ficus.

Fuente: Elaboración propia.

3.3 MEDICIÓN DE DIÁMETROS DE TRONCOS

En cuanto a los diámetros de los troncos, se midieron a una altura promedio de metro y medio para mantener un estándar de altura. Mediante el uso de una cinta métrica, enrollándola en todo su perímetro a la misma altura, se halló que los ficus de la UNI cercanos a la vía de la Túpac Amaru tenían un diámetro promedio de 39.2 cm. Por otro lado, los ficus de la FIC UNI, alejados de la vía de Túpac Amaru (ver figura 10), tenían un diámetro promedio de 20.4 cm. Sin embargo, se decidió que no puede ser un factor comparativo de esta etapa de la investigación, pues entre estos dos grupos de ficus, influye mucho la edad promedio que tienen.

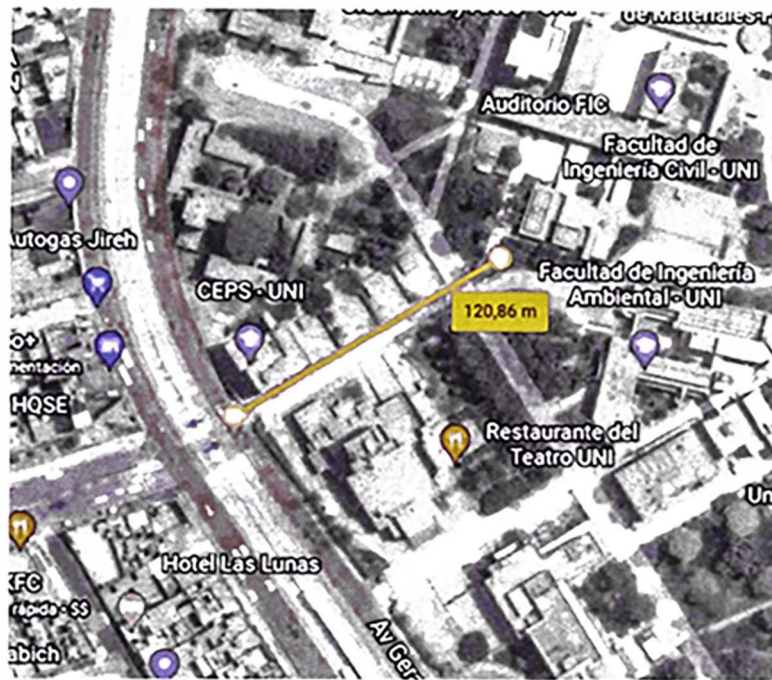


Figura 10. Distancia aproximada entre la Puerta N°04 de la UNI y la FIC UNI.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 1. Comparativo de diámetro entre ficus

Fuente: Elaboración propia.

FIC UNI		Puerta 4 - UNI	
Árbol	Diámetro (cm)	Árbol	Diámetro (cm)
T1	39.8	D1	20.2
T2	38.8	D2	24.5
T3	41.1	D3	20.5
T4	41.4	D4	21.0
T5	37.6	D5	15.5
T6	36.6	D6	20.5
Promedio	39.2	Promedio	20.4

3.4 ANÁLISIS CUALITATIVO DE LAS HOJAS

Respecto a las características de las hojas, inmediatamente extraídas del árbol se analizaron, de las cuales se puede distinguir claramente que las hojas de los árboles en zonas con alto tráfico vehicular tenían abundancia de partículas depositadas en su superficie. Además de ello, al tacto se pudo evidenciar hollín acumulado (ver figura 11) por los puntos de coloración oscura y grasosa; caso contrario en las hojas de las zonas poco contaminadas, la superficie se presenta limpia y con partículas depositadas casi insignificantes. Considerar que para

descartar las alteraciones tales como limpieza manual de las hojas y goteos por riego en la FIC UNI, se conversó con el jardinero para evitar que la superficie de las hojas sea alterada. A pesar de ello, puede que se hayan generado alteraciones por el riego, para disminuir esta brecha, se recogieron las hojas de puntos más distantes de la superficie del suelo (aproximadamente 1.80 metros). Respecto a las zonas de la Puerta 4 - UNI y Panamericana Norte Km. 298, son vegetaciones que no son regadas directamente por jardineros, más bien por pequeños canales.



Figura 11. En la izquierda, hojas de la zona con poco tráfico vehicular, a la derecha, hojas de la zona con alto tráfico vehicular.

Fuente: Elaboración propia.

3.5 ANÁLISIS CUANTITATIVO DE LAS HOJAS

En cuanto a la superficie de las hojas, si bien se buscó los márgenes de diferentes zonas, de manera general para ambas la dimensión promedio de las hojas de ficus son de 2.70 cm x 5.50 cm de ancho y largo respectivamente.

Respecto a las áreas, usando papel milimétrico, se colocaron las hojas de tal manera que se permita dibujar la silueta. Así, se contó la cantidad de cuadrados que rodeaba dicha silueta. Considerando que dichos cuadrados tienen un área de 0.5 cm², permitió obtener el área de las hojas (ver figura 12). De esta manera, se pudo obtener un área promedio de hojas de 16.50 cm².

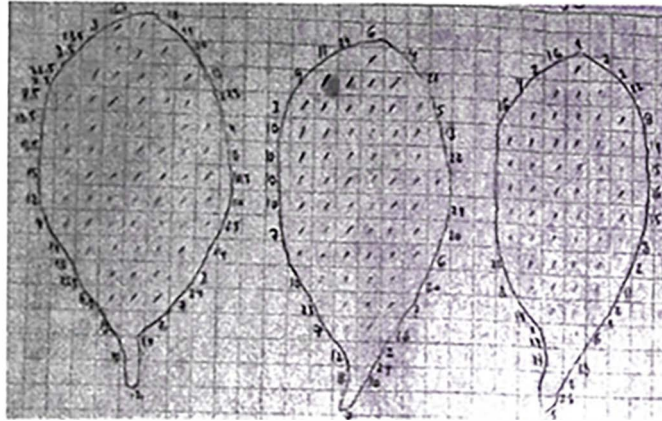


Figura 12. Medición de las áreas de las hojas en papel milimétrico.

Fuente: Elaboración propia.

Respecto al peso de las hojas, al tener problemas en cuanto a la precisión de la balanza para pesos menores a 1 gramo, se escogieron muestras que sobrepasen la cantidad de 150 hojas. Es decir, teniendo el peso de toda la muestra, se dividió entre el número de hojas, lo que permitió trabajar en unidad de gr/hoja hasta obtener el peso de las partículas depositadas por unidad de hoja, para luego con el área promedio obtener la concentración en gr/mm².

Tabla 2. Registro de la concentración de partículas.

Fuente: Elaboración propia.

Estación	Distancia a la vía (metros)	Hojas Analizadas	Peso inicial (gr/hoja)	Peso hoja limpia (gr/hoja)	Peso partículas (gr)	Área promedio (mm ²)	Concentración (gr/cm ² x 10 ⁴)
Puerta 4 - UNI	2	200	0.35	0.30	0.05	1650	30.30
Pan. Norte Km. 298	3	303	0.33	0.29	0.04	1650	24.24
FIC - UNI	120	400	0.27	0.26	0.01	1650	6.06

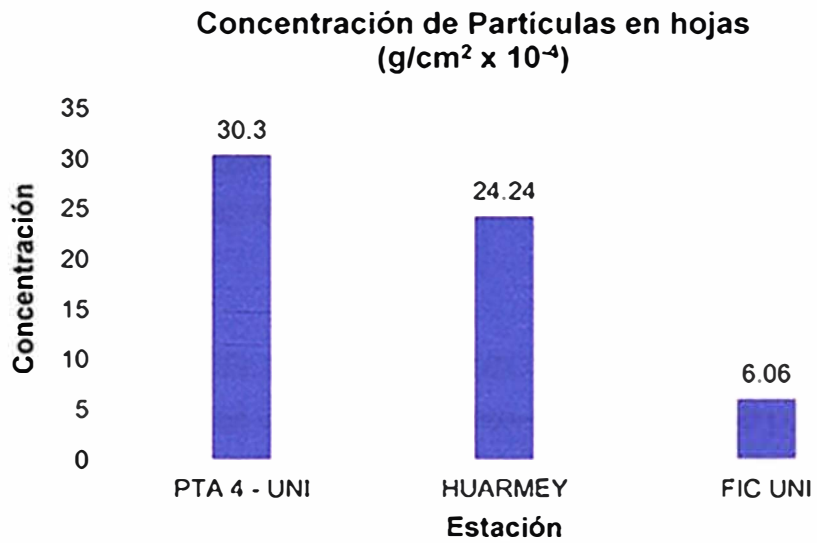


Figura 13. Comparativa de concentraciones de partículas en hojas.

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO IV: CONSTRUCCIÓN DE MEDIDOR DE CALIDAD DEL AIRE

A continuación, se presenta el procedimiento que se ha seguido para llegar al dispositivo propuesto, esto desde la adaptación del musgo (implica exploración para búsqueda de musgos y las exposiciones de prueba), así como la geometría propuesta y sus aparatos complementarios. Por último, su sistema de riego como factor principal.

4.1 JUSTIFICACIÓN DEL USO DEL MUSGO

El musgo es excelente en la fijación de contaminantes como el polvo fino. Debido a sus características fisiológicas específicas, el musgo es estrictamente diferente a las plantas con flores, ya que no tiene un sistema de circulación distintivo para transportar agua y nutrientes del suelo a todas las partes de la planta; como resultado, el musgo necesita reunir los nutrientes necesarios del aire.

Por eso, a los musgos se les llama "intercambiador de cationes". Las superficies de los musgos poseen la capacidad de carga electrostática. Al contrario del musgo, el polvo fino y los compuestos de óxido de nitrógeno tienen una carga negativa. Como resultado, surgen fuerzas de atracción y delimitación que permiten que el musgo acumule las sustancias e incluso absorben el polvo a través de sus hojas y lo digieren, de esta manera convirtiéndolo en fitomasa (Splittgerber & Saenger, 2015).

Después de descubrir las fortalezas del musgo, se tenía que identificar la especie apropiada, cuyos factores principales se decidió que serían las siguientes:

- Especie que se adapte al clima de la ciudad de Lima, espacio muestral de la presente investigación.
- Que dicha especie sea fácil de conseguir, ya sea por la cercanía a la ciudad, o por el mercado fluido de esta.
- Que esta especie crezca también en zonas poco contaminadas, es decir, en hábitat naturales, alejados de la ciudad de Lima, ya que de esta manera se podría obtener muestras de musgo sin concentración de contaminantes iniciales.

En un primer momento, se pensó en que el proceso de búsqueda de la especie adecuada sería una labor sencilla, ya que en épocas de invierno se puede ver

pequeñas muestras de musgo en los bordes de las veredas en algunos distritos de Lima, sobre todo las que se encuentran al Oeste de Lima (Huachipa, Chosica, La Molina, y sectores de Santa Anita). Sin embargo, esta etapa de la investigación se hizo en los meses de noviembre a diciembre del año 2020, épocas con registros bajos de precipitación y humedad (considerar que el musgo tiene una mejor adaptación en épocas húmedas); entonces, la opción de investigar con alguna especie propia de la ciudad se desvaneció, es ahí donde se optó por recurrir en la búsqueda de musgos fuera de la ciudad de Lima, y para asegurar dicha búsqueda se recurrió a la serranía del país.

4.2 PRIMERA EXPLORACIÓN

La primera exploración se dio a la provincia de Aija, departamento de Ancash, a 2 horas al Oeste de la Provincia de Huaraz. El principal motivo de elegir esta zona fue por mantener abundancia de especies de musgos; además, dicha zona es rural, con un alcance de contaminación antropogénica casi nula. Por último, se debe mencionar que tanto la zona como las rutas eran conocidas por las personas encargadas de la investigación.

Para llegar a los puntos naturales de acopio, se partió desde el valle de la provincia de Huarmey (ubicada a 298 km. al norte de Lima) en dirección al Oeste (ver figura 14), precisamente en las fechas del 19/10/2020 al 20/10/2020.



Figura 14. Mapa departamental de Ancash, puntos de extracción.

Fuente: Elaboración propia.

Se encontraron 2 especies de musgos abundantes en esta ruta *Leskea Polycarpa* y *Bryopsida* (ver figura 15). Estas especies se recolectaron cuidadosamente en recipientes de Cooler, conservando en lo mayor posible la unión entre el vegetal y su sustrato (ya sea tierra, madera o incluso piedra) con la finalidad de no alterar su capacidad de absorción. Tener en cuenta que por lo general estas 2 especies de musgo se encuentran al costado de canales naturales o en cataratas del río; es decir, en abundante agua con corrientes fluyendo permanentemente.

Básicamente, las extracciones significativas se dieron en 3 puntos en toda la exploración. La primera muestra se extrajo en una pequeña catarata cerca al pueblo de San Damián (ver figura 15), punto de extracción escogida por la abundancia de musgos en la parte superior y en la caída de la catarata, la especie extraída fue la "*Leskea Polycarpa*". Si bien es cierto se tuvieron 3 tonalidades de colores significativos (verde oscuro, verde claro, amarillo) (ver figura 16), se extrajo musgos de color verde oscuro, las mismas que se encontraban en el mismo flujo de corriente de agua. Se extrajeron 937 gr (ver figura 17). Si bien es cierto se contemplaba tener una muestra de 200 gr como prueba de exposición en la ciudad de Lima, se tuvo que extraer una cantidad mayor al doble de lo contemplado, para mitigar posibles deterioros, pérdidas y demás factores que tengan que ver con la exposición de estas muestras.

El sustrato de esta muestra fue de barro, propia de los sedimentos acumulados que transportaba el río. Con la ayuda de Smartphone, se pudo registrar los datos en tiempo real de la temperatura; a su vez, por intermedio del programa Google Earth, se obtuvo la altura de este punto y los demás. En este caso, la temperatura promedio en este punto fue de 23°C y la altura fue de 1037 msnm.

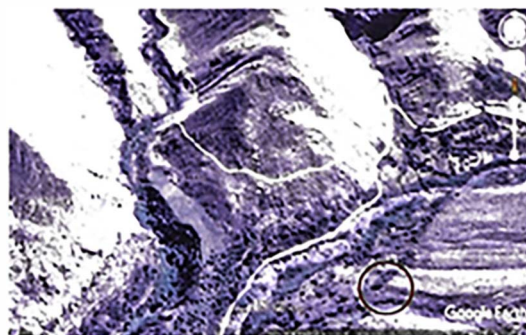


Figura 15. Primer punto de extracción

Fuente: Elaboración propia



Figura 16. Catarata del punto de extracción

Fuente: Elaboración propia



Figura 17 Muestra extraída, con su pesaje respectivo

Fuente: Elaboración propia

El segundo punto de extracción fue en el caserío de Quilloc (ver figura 18), perteneciente a la provincia de Aija. Este punto se escogió de manera correlativa de acuerdo con la ruta de extracción Huarmey – Aija y la visualización permanente, la especie extraída fue “*Bryopsida*” cuya coloración fue un verde oscuro. Esta muestra fue extraída de una acequia, con alcance de agua a modo de aspersion. Se extrajeron 530 gr. (ver figura 19). El sustrato de esta muestra fue de un pedazo de tronco, así como de una pequeña roca. El Smartphone registró una temperatura promedio de 19°C a una altura de 3090 msnm.



Figura 18. Segundo punto de extracción.

Fuente: Elaboración propia



Figura 19. Acequia del punto de extracción, con su pesaje respectivo

Fuente: Elaboración propia

Continuando con la ruta de exploración Huarmey – Aija, la tercera muestra fue extraída del río Monserrate (ver figura 20), perteneciente a la provincia de Aija, ya que en este punto se visualizó una gran concentración de musgos (ver figura 21). La especie extraída fue "*Bryopsida*", su coloración fue verde oscuro, propio de la abundante agua que recibe de manera permanente. Esta muestra fue extraída exactamente de una pequeña catarata, con alcance de agua directa ya que parte de esta muestra estaba sumergida. Se extrajeron 530 gr. (ver figura 22). El sustrato de esta muestra fue barro, propia del sedimento que transporta el río,

además de la propia roca. Con la ayuda del Smartphone, se pudo registrar una temperatura promedio de 17°C a una altura de 3180 msnm.



Figura 20. Tercer punto de extracción

Fuente: Elaboración propia

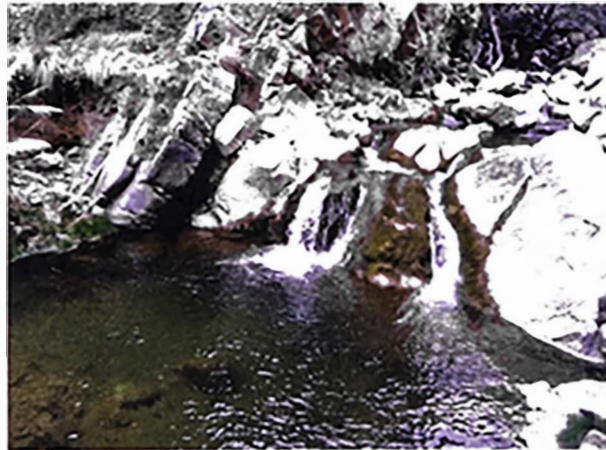


Figura 21. Catarata del punto de extracción

Fuente: Elaboración propia



Figura 22. Muestra extraída con su pesaje respectivo

Fuente: Elaboración propia.

Estas muestras fueron conservadas en el cooler correspondiente durante 4 días, periodo de traslado hacia Lima, considerando una parada en la ciudad de Huarney. Para mantener los musgos en dicho periodo de traslado, se llenó agua al cooler para mantenerlos húmedos, y se hicieron respectivos cambios de agua de manera diaria.

En la siguiente imagen (ver figura 23), de izquierda a derecha: tercera, segunda y primera extracción. La muestra del medio es la Bryopsida, y de los extremos Leskea Polycarpa.



Figura 23. Muestras en recipiente de traslado.

Fuente: Elaboración propia

4.3 PRIMERA EXPOSICIÓN DE MUSGOS

Ya en Lima, se llevaron a la Universidad Nacional de Ingeniería, para su inmediata exposición al medio ambiente. En ese sentido, se utilizó una repisa de 125 cm de alto, como altura promedio del transeúnte, entre niños y adultos. Dicha repisa estuvo a 2.5 m. respecto del borde de vía de la Av. Túpac Amaru, y a modo de dar mayor referencia, se instaló a 30 m. aproximadamente de la Puerta N°4 de la UNI (ver figura 24).



Figura 24. Repisa donde se colocaron las muestras

Fuente: Elaboración propia

Entonces, estas muestras fueron expuestas para verificar su adaptación al clima. En esta primera exposición, los musgos se colocaron incluyendo los sustratos sobre recipientes con agua, con el fin de que, en lo mayor posible, mantenerlos en su estado natural, además de mantenerlos frescos y húmedos.

Como parte del orden y facilidad del seguimiento, las muestras se fraccionaron en 6 recipientes codificados de la siguiente manera (ver figura 25).

- T1-EA-231020: Muestras del tercer punto de extracción – Parte superior.
- T2-EA-231020: Muestras del tercer punto de extracción – Parte inferior.
- T3-EB-231020: Muestras del segundo punto de extracción – Parte superior.
- T4-EB-231020: Muestras del segundo punto de extracción – Parte inferior.
- T5-EA-231020: Muestras del primer punto de extracción – Parte superior.
- T6-EA-231020: Muestras del primer punto de extracción – Parte inferior.

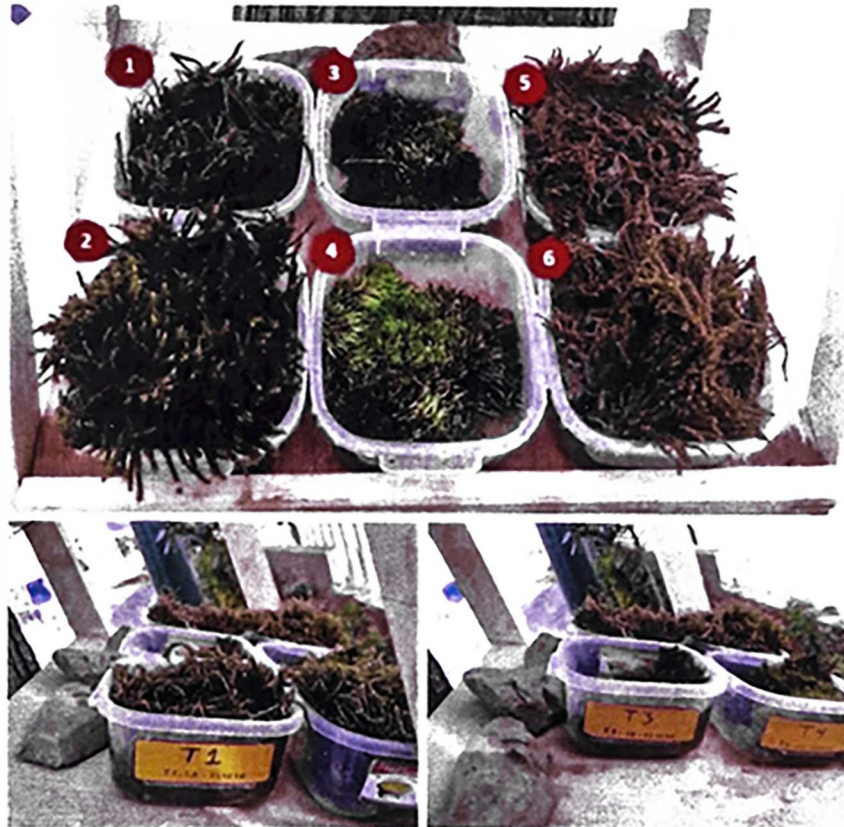


Figura 25. Colocación y codificación de muestras.

Fuente: Elaboración propia

Considerar que la fecha de inicio de la exposición fue el día viernes 23/10/2020. Se realizó un seguimiento de manera diaria, considerando como una de las actividades el cambio de agua debajo del sustrato. Sin embargo, por ser fin de semana y restricciones de pandemia, no se pudo acceder al campus universitario durante estos días (es decir sábado y domingo), impidiendo el mantenimiento de las muestras. Entonces, para el día lunes 26/10/2020 las muestras sufrieron un cambio significativo, sobre todo de la especie *Leskea Polycarpa*, con una coloración blanca, dando el aspecto de estar gran parte marchitada. En cuanto a la *Bryopsida*, si bien es cierto no se mostró cambios significativos, pero se pudo observar el oscurecimiento de la planta en la parte sumergida en el agua (ver figura 26).



Figura 26. Cambios significativos de las muestras

Fuente: Elaboración propia

Como conclusiones en esta primera etapa, la *Leskea Polycarpa* necesita de una corriente de agua que provoque flujos y de ser posible goteos, permitiendo de esta manera asemejarse a sus condiciones naturales, además que su reacción al agua empozada es desfavorable.

En cuanto a la *Bryopsida*, si bien no necesita un sistema de goteo, requiere de un constante cambio de agua. Como alternativa, se sugirió un pequeño sistema de riego. Después de tener este primer resultado de la primera exploración y exposición, era necesario aprender un poco más de las buenas prácticas para el cuidado de los musgos. Es así como se encontró un extracto de documentos y artículos (Frahm, 2013) sobre datos interesantes de esteras de musgo. Los cuidados recomendables eran los siguientes.

- En su mayoría las especies de musgo se mantienen en ambientes húmedos, es por ello que, para adaptarlos, se debe adecuar un ambiente húmedo para su conservación.
- De preferencia, debe mantenerse en ambientes sombríos y frescos.
- En cuanto al transporte, no existe alteraciones significantes, colocándolas uno sobre otro.
- Es mejor mantener las muestras en su propio sustrato (piedra, rama de árbol, etc.) obteniendo la mayor comodidad posible del musgo.
- En cuanto al tipo de especie, son mejor las especies que, en su hábitat natural, están expuestas al sol y con la menor cantidad de agua posible, ya que esto

garantiza que dichas especies tendrán mayor resistencia al adaptarlo en un clima con mayor temperatura promedio, y con abastecimiento de agua limitado.

Debido a que se tiene poco sustrato, se debe abastecer de agua constantemente. Entonces, de acuerdo con las conclusiones de la primera exposición, y la bibliografía encontrada, a manera de mejora, se propuso implementar un pequeño sistema de riego por goteo que pueda mantener húmedo a los musgos por medio de agua fluyente. Dicha instalación se llevó a cabo el 01/11/20 de manera provisional, para ver la reacción de las muestras.

Para ello, se utilizó pequeñas salidas de agua, propios del tipo de riego por goteo, para cada vasija, además de mangueras de 1/2" que conduzcan el agua del alimentador (botella de 3 litros) hacia dichas salidas (ver figura 27).



Figura 27. Accesorio para el riego por goteo y manguera de 1/2"

Fuente: Elaboración propia

Considerar que, para este primer caso, no se hizo cálculos de por medio para dar el riego adecuado. Es decir,—después de colocar el pequeño sistema, el reabastecimiento de agua se hacía de manera diaria, sin proyectar la salida para que el agua dure exactamente un día (ver figura 28 y figura 29).

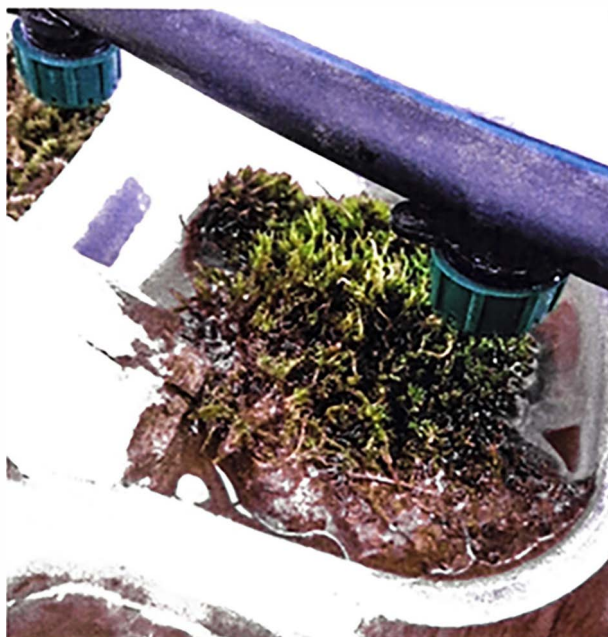


Figura 28. Cabezales en cada vasija con muestras de musgo.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 29. Sistema de Riego, abastecedor de agua (botella de 3 litros).

Fuente: Elaboración propia.

Sin embargo, a los 2 días de la implementación del sistema de riego, se generó un gran problema, el cual fue que la manguera que distribuía el agua a cada cabezal se deflectaba, de manera que el goteo solo se daba en uno de los cabezales, en lugar de abastecer de agua a todos los cabezales. Las causas son propias de las propiedades del material de la manguera, la cual es flexible, y otra que ya se había mencionado es que el no calibrar las salidas de manera que el

agua pueda abastecerse por un periodo de 24 horas aproximadamente, estaba repercutiendo en el aspecto de los musgos, ya que aún avanzaba el aspecto oscuro en la superficie de esta (ver figura 30).



Figura 30. Problemas con los musgos.

Fuente: Elaboración propia.

En la parte superior, se puede notar la deflexión de la manguera, factor que permitía que sólo el cabezal que se muestra tenga salida de agua. Además, se puede ver que los musgos siguen avanzando en su aspecto marchitado. Por ello, se tuvo que mejorar el sistema de riego de manera urgente, es así que el 04/11/20 se adaptó un nuevo sistema de riego. Para ello, se tuvo que sujetar las mangueras horizontales en los elementos horizontales de la repisa, de tal manera que se evite su deflexión. A su vez, se calibró las salidas de agua de los cabezales, de tal manera que el agua de la botella dure 24 horas a un flujo constante.

Dicho cálculo se llevó de la siguiente manera:

- Tiene como dato que en un mililitro se tienen aproximadamente 20 gotas. Entonces, para 3 litros, por regla de 3 simple, se tendrán 60,000 gotas aproximadamente.

Tabla 3. Gotas por Litro.

Fuente: Elaboración propia

	Gotas	Litro
Dato	20	0.001
Para 3 litros	60000	3.000

- También por regla de 3 simple, se obtiene que en 24 hrs se tiene 86,400 segundos.

Tabla 4. Segundo en hora.

Fuente: Elaboración propia

Hora	Segundos
1	3600
24	86400

- Dividiendo la cantidad de segundos que hay en 1 hora (86,400) por la cantidad de gotas por 3 litros (60,000), se obtuvo 1.44 seg/gota. Es decir que, emitiendo una gota cada 1.44 segundos se llegará a abastecer de agua fluida por 24 horas con una botella de 3 litros.
- Pero, sabiendo que se tienen 6 salidas de agua, multiplicando 1.44 por 6, se obtiene 8.64. Es decir que, para que el agua dure 3 litros por 24 horas, en 6 salidas (ver figura 28), se debe gotear cada 8.64 segundos.
- Sin embargo, para no manejar fracciones, se redondeó a 9 segundos como intervalo entre gota y gota de cada salida. De esta manera, se podrá tener aproximadamente una hora de retraso; entonces, se esperaría que el agua aún dure una hora más por si existen retrasos.

Es así que se generó el sistema de riego con 6 salidas de goteo, además de la manguera con una permanencia horizontal, sin deflexiones (ver figura 31).



Figura 31. Nuevo sistema de goteo.

Fuente: Elaboración propia.

4.4 INICIO DE LA ADAPTACIÓN DE MOSSPHERAS

Si bien es cierto, hasta el momento se tenía en pruebas de ensayo y error de adaptación de las muestras de musgo en el medio ambiente limeño, en paralelo se decidió ya iniciar con las pruebas de instalación de los dispositivos donde se colocarían las muestras de musgo. Es decir, las pruebas que se habían hecho hasta ese momento eran básicamente para adaptación del musgo en el clima limeño, pero era necesario decidir por el dispositivo que sostendría dichas muestras.

No se optó por emplear los estantes anteriormente explicados (ver figura 23) por los siguientes motivos:

- Una de las explicaciones claras era el inconveniente del agua empozada que se generaba en las vasijas que soportaban los musgos, lo cual causaba alteraciones notables tales como el oscurecimiento de los musgos.
- Otra explicación, y la más importante, era que la absorción se daría solo en un sentido (superficie del musgo), lo cual sería un gran inconveniente por la dirección del viento, ya que, si la dirección se da en sentido contrario a la superficie del estante, la absorción sería menor por la llegada de pocas

partículas (ver figura 32). En contraste a ello, el dispositivo planteado es de forma esférica, característica sustancial para lograr la absorción en todas las direcciones.



Figura 32. Dirección del viento en 2D.

Fuente: Elaboración propia.

Esta dirección del viento permite explicar los inconvenientes. Entonces, como ya se mencionó, estos dispositivos consisten en esferas que en su alrededor tienen musgos. Para definirla con más detalle, se propuso una esfera de tecnopor para maceteros, colocada concéntricamente dentro de 2 coladores de 14 cm de diámetro, formando una esfera entre sus semiesferas que tienen, de tal manera que, entre este tecnopor y la esfera formada por los coladores, quede un espesor aproximado de 1 cm. Dicho espesor es donde se colocarán las muestras de musgo distribuidas equitativamente.

Estos dispositivos se plantearon colocarlos a una altura aproximada de 3 metros de altura, con el fin que pueda captar la polución que emerge directamente de los vehículos. Entonces, para hacer las pruebas de funcionamiento de este dispositivo, fue necesario tener nuevas muestras, libres de una exposición previa al medio ambiente limeño. Es por ello que se optó hacer una segunda expedición. Pero el cuestionamiento era con qué especie se tendría que implementar dicho

dispositivo. Para ello, se debe tener en cuenta que los musgos tienen una mejor capacidad de absorción mientras más grande es su área por m³. Si bien es cierto, no se puede medir fácilmente este indicador, pues podemos concluir que son más efectivos los musgos con hojas de mayor longitud, exactamente similar a la estructura de la especie *Leskea Polycarpa* (ver figura 23). Por ello, se pasa a mostrar la segunda expedición.

4.5 SEGUNDA EXPLORACIÓN

Esta exploración se llevó a cabo el día 02/11/20, el punto de extracción fue directamente desde el primer punto de extracción de la primera expedición (ver figura 33), donde abunda la especie de *Leskea Polycarpa* (ver figura 34), que está expuesta al sol en mayor parte del día. Por último, mencionar que la altura donde se encuentra este punto es de 1037 msnm, la más próxima de los 3 puntos de extracción.



Figura 33. Pequeña catarata con presencia de *Leskea Polycarpa*.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 34. Muestra extraída.

Fuente: Elaboración propia.

Tener en cuenta que esta muestra se extrajo junto con su sustrato, que en este caso es la sedimentación propia del río, en su mayoría limo y arcilla. De manera similar a la primera expedición, se tuvo el cuidado respectivo para no alterar sus concentraciones iniciales de absorción de los musgos, para eso se transportó y se conservó en cooler las muestras.

4.6 COLOCACIÓN DE MUESTRAS DE MUSGO EN ESFERAS

El 10 de noviembre del 2020 se colocó la primera esfera a 30 metros de la Puerta N°04 de la Universidad Nacional de Ingeniería, exactamente encima del estante de las muestras colocadas anteriormente. Los materiales utilizados fueron los siguientes:

- 2 coladores grandes de 14 cm de diámetro.
- Tecnopor verde para macetero.
- Cinta plástica de seguridad.
- ½ kg de Alambre #14
- Soporte hecho de tubos (40 cm x 20 cm)
- Equipo de Venocllisis. (ver figura 35)
- Botella de 3 litros

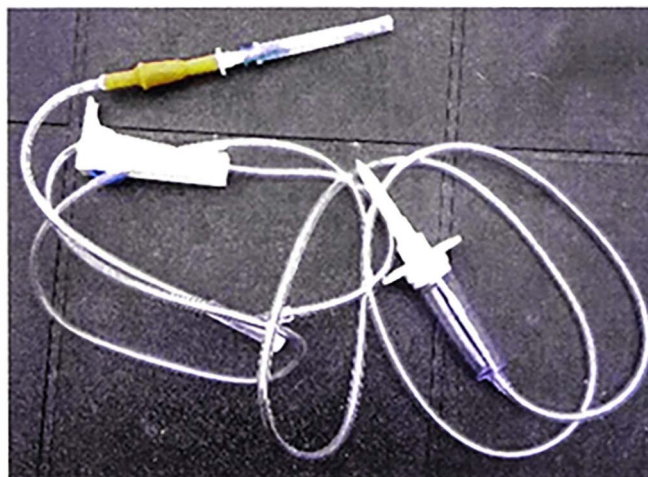


Figura 35. Equipo de Venocllisis.

Fuente: Elaboración propia.

Primero, se colocó el tecnopor en ambos coladores, procurando que entre ambos elementos exista un espacio de 1 cm de espesor aproximadamente (ver figura 36).



Figura 36. Colocación de tecnopor en coladores.

Fuente: Elaboración propia.

Luego, se colocó las muestras de musgo en todo el contorno del tecnopor (ver figura 37).



Figura 37. Musgo colocado en todo el contorno.

Fuente: Elaboración propia.

De esta manera se pasó a juntar los 2 coladores y asegurarlo respectivamente. (ver figura 38).



Figura 38. Esfera lista para ser expuesta.

Fuente: Elaboración propia.

Teniendo ya lista la esfera, se procedió a colocar a una altura de 3.50 metros. Para ello, se colocó el soporte de tubería con la ayuda de alambre ajustada a todo el contorno del árbol. De igual manera, la botella de 3 litros fue sujeta al árbol con ayuda de alambres (ver figura 39).



Figura 39. Sistema instalado.

Fuente: Elaboración propia.

El riego consistió en llenar la botella de 3 litros cada 24 horas. Sin embargo, a partir del tercer día de exposición, el goteo ya no estaba funcionando correctamente, ya que la altura del agua empezó a mantenerse constante, lo que suponía que estaba ocurriendo obstaculización del sistema en alguna parte de la tubería. Es así como el día 18 de noviembre del 2020 se hizo un mantenimiento a todo el sistema, donde efectivamente se encontró la obstaculización del agua en el filtro del equipo venocllisis (ver figura 40).



Figura 40. Obstaculización en el filtro.

Fuente: Elaboración propia.

Consecuentemente al riego desfavorable, las hojas del musgo fueron encontradas resacas, como factor principal es la obstaculización del riego, además que la misma especie de musgo (*Leskea Polycarpa*) no estaba adaptándose al clima limeño.

El segundo factor era el más acertado, pues en paralelo a la exposición de la esfera, se siguió colocando muestras en el estante, y en ambos lugares, las muestras de musgo tenían las hojas secas (ver figura 41 y figura 42).



Figura 41. Muestras de musgo secas al 18 de noviembre del 2020.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 42. Hoja seca de la muestra de la esfera al 18 de noviembre del 2020.

Fuente: Elaboración propia.

Esas últimas inspecciones de las muestras hicieron que se llegase a la conclusión de manera empírica, que la especie *Leskea Polycarpa* no era la adecuada para este tipo de experimentos. Es por ello que se propuso buscar otra especie como alternativa.

4.7 TERCERA EXPLORACIÓN

Es aquí cuando se llegó a saber de la especie *Sphagnum Moss*, una especie de musgo conocido comercialmente como musgo blanco, abundante en las

comunidades campesinas de Jauja, que son los que actualmente exportan a Europa y Norteamérica con fines de mejorar el sustrato de las plantaciones, así como un fin ecológico.

En ese sentido, se hizo la exploración respectiva a las comunidades mencionadas para saber a detalle de dicha especie. El 06 de enero del 2021, se llegó a la ciudad de Jauja, a la empresa InkaMoss, encargada de acopiar, procesar y exportar el Sphagnum Moss. En este lugar se dio la referencia de la Comunidad Campesina de Jauja, ubicadas a más de 3,500 msnm (ver figura 43), desde donde extraen los musgos de su hábitat natural.

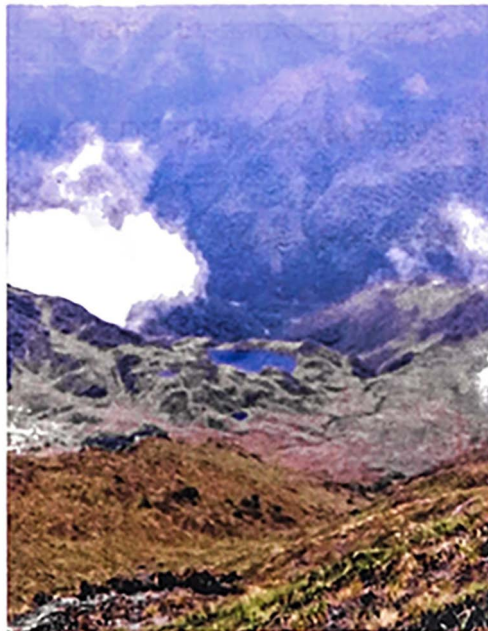


Figura 43. Hábitat del Sphagnum Moss, comunidad campesina de Jauja.

Fuente: Elaboración propia.

Por cuestiones de salubridad, no se tuvo acceso a esta comunidad, ya que los campesinos con el fin de evitar contagios del Covid-19, restringieron el acceso para personas foráneas. Sin embargo, gracias al apoyo de la empresa InkaMoss, se pudo obtener musgos frescos directo de su hábitat natural (ver figura 44) el cual, continuando con la conservación de sus propiedades, se hermetizó por completo para su traslado hasta Lima.



Figura 44. Sphagnum Moss recién extraída de su hábitat natural.

Fuente: Elaboración propia.

4.8 PRIMERA COLOCACIÓN DE SPHAGNUM MOSS EN ESFERAS

4.8.1 Esferas de musgo

El dispositivo que se colocó en esta etapa tuvo un pequeño cambio respecto al modelo anterior; se trata del tecnopor en la parte interna, pues esta vez sería un tecnopor esférico de 12 cm de diámetro.

Entonces, se colocó el musgo de manera equitativa en la superficie interna de los coladores (ver figura 45).



Figura 45. Colocación de musgo y esfera de Tecnopor.

Fuente: Elaboración propia.

Luego, se colocó la esfera de tecnopor, y se juntó los coladores e inmediatamente se aseguró con cintas de seguridad. Por último, para mantener registro, se codificó cada dispositivo (ver figura 46).



Figura 46. Dispositivos codificados para la Estación 001, Puerta N°4 – UNI.

Fuente: Elaboración propia.

Respecto a las estaciones. de manera general, 4 de ellas estuvieron ubicadas en Lima Metropolitana (ver figura 47), y una estación en la ciudad de Huarney (ver figura 6). Más adelante se profundiza las ubicaciones de cada estación.

Se agregaron nuevas zonas de estudio para tener mayor variedad en cuanto a las realidades del tráfico vehicular. Se escogieron estas estaciones por la representación a realidades distintas teniendo en cuenta el tráfico vehicular. La Puerta N° 4 de la UNI y la Puerta N° 3 de la UNMSM son zonas que tienen vías con tráfico vehicular masivo (más adelante se detallan los números), La FIC - UNI es una zona que representa el tráfico vehicular casi nulo. La Panamericana Norte Km 295 es una zona que representa a las vías interdepartamentales. Y finalmente, la estación ubicada en Ancón, representa a las vías con tráfico de vehículos menores (motos y mototaxis) en su mayoría.

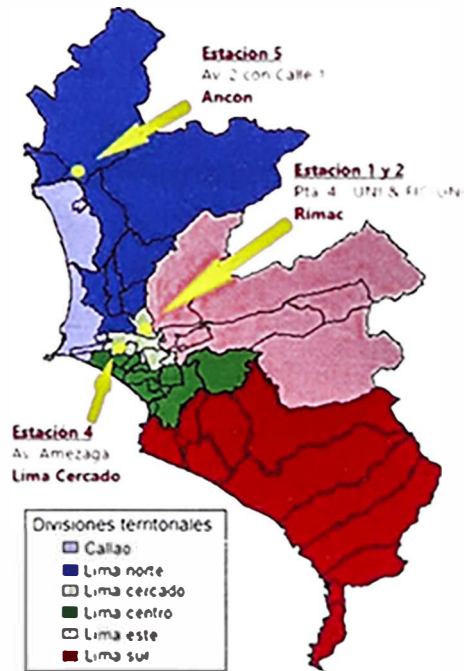


Figura 47. Distribución de estaciones en Lima Metropolitana.

Fuente: Elaboración propia.

Se colocaron 3 dispositivos por estación, porque el primer dispositivo estaría por un periodo de un mes, el segundo dispositivo por 2 meses y el tercero fue un dispositivo de contingencia. La codificación fue de la siguiente manera:

EST<Número de Estación>-<Día y mes de Instalación>-<Número de dispositivo>

Entonces, los dispositivos instalados fueron los siguientes según estación:

- Estación N°01: Puerta 4 – UNI

EST001-1601-01

EST001-1601-02

EST001-1601-03

- Estación N°02: FIC – UNI (Campus universitario)

EST002-1601-01

EST002-1601-02

EST002-1601-03

- Estación N°03: Panamericana Norte Km 295, Huarney

EST003-1801-01

EST003-1801-02

EST003-1801-03

- Estación N°04: Av. Amezaga. Puerta N°3 UNMSM

EST004-1601-01

EST004-1601-02

EST004-1601-03

- Estación N°05: Av. 2 con Calle 1, Ancón

EST005-1701-01

EST005-1701-02

EST005-1701-03

Tener en cuenta que, aparte de las muestras de musgo colocadas en los dispositivos, se llevó una muestra de 80 gr. (punto blanco) al laboratorio para su análisis mediante el ensayo Espectrofotometría de absorción atómica en llama.

Dicho ensayo fue elegido por su fiabilidad y el costo accesible en comparación con otras herramientas (los aparatos electrónicos llegan a costar alrededor de 13,000 hasta 25,000 dólares, respecto a estaciones de monitoreo, como se verá más adelante, tienen costos sumamente altos tanto para la instalación como para el mantenimiento).

Entonces, la finalidad fue hallar las concentraciones iniciales de metales pesados en los musgos con las que llegaron de su hábitat natural. (ver tabla 5).

Tabla 5. Concentraciones Iniciales de musgo.

Fuente: Elaboración propia

Parámetros (Metales pesados)	Punto Blanco (mg/kg)
Arsénico (As)	0.02
Cadmio (Cd)	1.40
Cobre (Cu)	6.80
Cobalto (Co)	3.20
Cromo (Cr)	0.50
Níquel (Ni)	1.50
Plomo (Pb)	3.30
Zinc (Zn)	27.00

4.8.2 Modalidad de riego

Después de la última experiencia con la obstrucción de las mangueras de riego permanente, en esta etapa se optó por hacer un riego manual cada 8 horas (durante la mañana: 8:00 am, durante el medio día: 12:00 pm, durante la tarde: 6:00 pm) con el uso de chisguete, dejando húmedo el musgo hasta el punto de gotear (ver figura 48).



Figura 48. Riego manual, Estación N°03.

Fuente: Elaboración propia.

4.8.3 Aparatos electrónicos (cámara y sensor)

En esta etapa, conjuntamente a los dispositivos biomonitores, se instalaron las cámaras y el sensor, aparatos que tenían por función grabar el tránsito vehicular y medir parámetros meteorológicos respectivamente (ver figura 49).

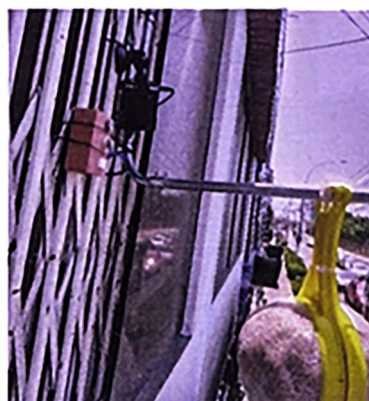


Figura 49. Sensor y cámara instalados, Estación N°04.

Fuente: Elaboración propia.

El sensor, aparato electrónico que tenía la capacidad de medir la concentración de monóxido de carbono (CO), humedad y temperatura. Sus dimensiones son 9 cm x 6 cm x 3 cm y funcionaban con energía eléctrica, es por ello que estaban conectados permanentemente a una batería portátil. Su horario de uso era de 7:00 am a 6:00 pm, los datos recopilados por este dispositivo se guardaba en una memoria interna, los cuales se llevaban a la computadora de manera diaria para almacenarlas y posteriormente procesarlas (ver figura 50).



Figura 50. Sensor electrónico para medir CO, humedad y temperatura.

Fuente: Elaboración propia.

La cámara, tenía baterías recargables, pero que duraba solo 4 horas, por lo que se conectó directamente a los cargadores portátiles (ver figura 51). Para guardar la información, se le introducía a la cámara unas memorias de 16 Gb que es donde se almacenaba lo grabado, lo que reflejaba una duración de video almacenado de hasta 10 horas.



Figura 51. La cámara de la Estación 04, conectada al cargador portátil.

Fuente: Elaboración propia.

Entonces, como ya se había mencionado líneas arriba, tanto la cámara como el sensor eran alimentados de energía por el cargador portátil (ver figura 52), cuyo rendimiento cuando se cargaba al 100%, podía mantener a ambos dispositivos por un periodo de hasta 24 horas.

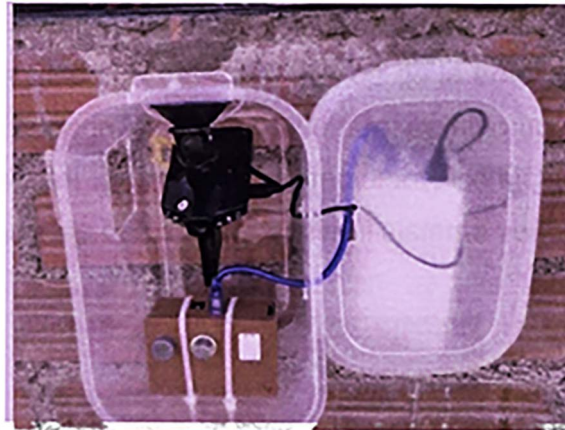


Figura 52. La cámara y el sensor alimentados por la batería portátil.

Fuente: Elaboración propia.

Sin embargo, después de 10 días del inicio de esta experimentación (27 de enero del 2021), en la inspección general a todos los dispositivos de cada una de las estaciones, se encontraron deficiencias:

- En cuanto al musgo, nuevamente se tenían muestras de musgos secos, lo que se interpretaba que se seguía regando de manera inadecuada. Una observación detallada es que con la cantidad de musgo que se notaba compacto los dispositivos, al regar la humedad solo llegaba a la parte externa de la esfera. En cuanto a la parte interna, la humedad llegaba poco o nada, esto era una desventaja ya que se esperaba que la humedad sea permanente y en cada hoja de musgo. Es por ello que sería necesario reducir la cantidad de musgo en cada dispositivo para que la humedad y el aire contaminado llegue a cada hoja, y sobre todo un sistema de riego efectivo que logre mantener húmedo las 24 horas del día las muestras expuestas.
- En cuanto a las cámaras, en algunos casos las cámaras se apagaban 2 a 3 horas antes de la hora establecida a grabar (6:00 pm), uno de los motivos era una mala coordinación para colocar los cargadores portátiles con su carga al 100%. Además, en algunas ocasiones, se olvidó hacer los cambios de baterías,

lo que ocasionaba que para el día siguiente no se tenga baterías para funcionar los aparatos electrónicos.

4.9 MEJORAMIENTO DEL SISTEMA DE RIEGO

Durante el mes de febrero del 2021, se hicieron pruebas para el nuevo sistema de riego, se utilizó un bidón de agua de 7 litros como recipiente para llenar agua, colocada de manera invertida para que el pico de la botella esté boca abajo. Es así que, en la parte superior del bidón invertido, se hizo un orificio para equilibrar la presión. Por último, en la tapa de este recipiente se hicieron 02 orificios de tal manera que se tengan las dos salidas hacia el sistema venocllisis (ver figura 53).



Figura 53. Recipiente que abastece de agua al Sistema de Riego.

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a la salida de agua, con los cálculos hechos anteriormente en la que se calibraban para que se tengan gotas cada 9 segundo en 6 salidas de agua, teniendo en cuenta que a pesar de ello no se tuvieron buenos resultados, se decidió hacer ensayos de rendimiento con el objetivo de mantener húmedo los dispositivos permanentemente. Es por eso que se trabajó con salidas de agua con gotas cada 04 y 07 segundos.

Para el Sistema de gotas cada 4 segundos (ver figura 54), se ensayó durante 02 días (6 y 7 de febrero del 2021), cuyos resultados fueron musgos húmedos de manera permanente, pero solo mantuvo a 2 dispositivos.



Figura 54. Dispositivos húmedos para gotas cada 4 segundos.

Fuente: Elaboración propia.

Para el Sistema de gotas cada 7 segundos (ver figura 55), se ensayó en paralelo. Sus resultados fueron musgos húmedos de manera permanente, y mantuvo esto para los 03 dispositivos.



Figura 55. Dispositivos húmedos para gotas cada 7 segundos.

Fuente: Elaboración propia.

Es necesario recalcar que, en un primer momento, el sistema de venoclisís llegaba a las esferas por una sola salida que era la propia manguera. Sin embargo, el tener solo una salida tenía 02 grandes riesgos:

- Si esta única salida se obstruía, la esfera ya no podría ser regada y por lo tanto se secaría.
- Esta única salida podría llegar solo a una parte de la esfera, impidiendo que el riego no sea homogéneo para toda la muestra de musgo.

Para esta etapa, se planteó hacer una corona a la esfera con la misma manguera con pequeños orificios (ver figura 56).

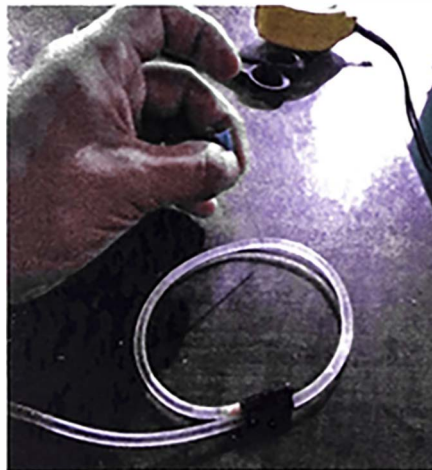


Figura 56. Corona de manguera con orificios para salida de agua.

Fuente: Elaboración propia.

De tal manera que la salida de agua sea homogénea para toda la muestra de musgo que está en todo el perímetro de la esfera (ver figura 57).



Figura 57. Prueba de cómo se distribuirá la corona dentro de la esfera.

Fuente: Elaboración propia.

Por último, respecto a las muestras de musgos, una de las dificultades que se tuvo hasta ese momento fue por efecto de la gravedad que los musgos se concentran en la parte inferior de la esfera, lo cual provocaba que la muestra no esté distribuida homogéneamente, impidiendo la buena recepción de aire contaminado. Entonces, para solucionar este problema, se incrustaron diametralmente opuesto mondadientes de 20 cm., cuya función fue la de retener las hojas para que no puedan ir a la parte inferior (ver figura 58).

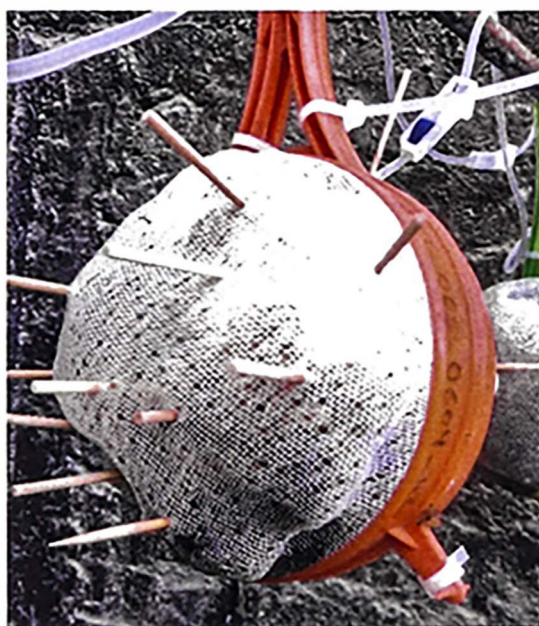


Figura 58. Mondadientes incrustados diametralmente opuestos.

Fuente: Elaboración propia.

4.10 SEGUNDA COLOCACIÓN DE SPHAGNUM MOSS EN ESFERA

Entonces, durante los días 11, 12 y 13 de abril del 2021 se hicieron todos los preparativos para la instalación de los dispositivos en cada estación, los objetos a instalar fueron los siguientes:

- Una cámara
- Un sensor
- Una batería recargable para abastecer la cámara y el sensor
- Un sistema de riego
- 03 dispositivos biomonitores de aire (01 para el primer mes, 01 para el segundo mes, 01 de contingencia)

En cuanto a la codificación de los dispositivos, fueron similares a la codificación de la prueba anterior, pero esta vez acompañada de un apóstrofe al final.

- Estación N°01: Puerta 4 – UNI

EST001-1404-01'

EST001-1404-02'

EST001-1404-03'

- Estación N°02: FIC – UNI (Campus universitario)

EST002-1404-01'

EST002-1404-02'

EST002-1404-03'

- Estación N°03: Panamericana Norte Km 295, Huarmey

EST003-1404-01'

EST003-1404-02'

EST003-1404-03'

- Estación N°04: Av. Amezaga. Puerta N°3 UNMSM

EST004-1404-01'

EST004-1404-02'

EST004-1404-03'

- Estación N°05: Av. 2 con Calle 1, Ancón

EST005-1404-01'

EST005-1404-02'

EST005-1404-03'

La estación N°01 quedó ubicado a la altura de la Puerta N°4 de la UNI, a 100 metros aproximadamente hacia el sur de la puerta, en uno de los árboles que da hacia la Avenida Túpac Amaru. A una altura de 3.50 metros desde el nivel del suelo (ver figura 59). Fecha de Inicio de Operación: 14 de abril del 2021.



Figura 59. Estación N°01.

Fuente: Elaboración propia.

La estación N°02 quedó ubicado en el Campus Universitario, en la entrada a la Facultad de Ingeniería Civil, a una distancia de 250 metros aproximadamente hacia el este de la puerta N°4. Los dispositivos fueron instalados a una altura de 3.30 metros desde el nivel del suelo (ver figura 60). Fecha de Inicio de Operación: 14 de abril del 2021.



Figura 60. Estación N°02.

Fuente: Elaboración propia.

La estación N°03 quedó ubicado en la Panamericana Norte Km 296, Huarney. Los dispositivos fueron instalados a una altura de 3.45 metros desde el nivel del suelo (ver figura 61). Fecha de Inicio de Operación: 14 de abril del 2021.



Figura 61. Estación N°03.

Fuente: Elaboración propia.

La estación N°04 quedó ubicado en la Av. Amezaga al frente de la Puerta N°3 de la UNMSM. Los dispositivos fueron instalados a una altura de 3.30 metros desde el nivel del suelo (ver figura 62). Fecha de Inicio de Operación: 14 de abril del 2021.



Figura 62. Estación N°04.

Fuente: Elaboración propia.

La estación N°05 quedó ubicado en la Calle 19 - Villa Los Reyes - Ventanilla. Los dispositivos fueron instalados a una altura de 3.70 metros desde el nivel del suelo (ver figura 63). Fecha de Inicio de Operación: 14 de abril del 2021.



Figura 63. Estación N°05.

Fuente: Elaboración propia.

Para todas las estaciones, el cambio de agua al recipiente que abastecía el sistema de riego fue cada 24 horas, lo cual los ensayos previos garantizaban que las muestras se mantenían húmedo.

CAPÍTULO V: ANÁLISIS DE DATOS

En el presente capítulo, se explica el proceso con el cual se realizó el análisis de los datos recopilados.

5.1 CONDICIONES METEOROLÓGICAS

Se colocó un sensor electrónico cuya función es la de monitorear concentraciones de dióxido de carbono, humedad del aire y temperatura, con una frecuencia de cada 3 segundos (ver tabla 6).

Tabla 6. Hoja de reporte emitido por el Sensor Electrónico.

Fuente: Elaboración propia

Equipo:	ETHC-01			
Fecha:	Hora:	Temperatura	Humedad	CO2
12/05/2021	09:21:24	21.2	71.4	545
12/05/2021	09:21:27	21.1	71.3	545
12/05/2021	09:21:30	21.1	71.3	552
12/05/2021	09:21:33	21.1	71.4	558
12/05/2021	09:21:36	21.1	71.4	558
12/05/2021	09:21:39	21.1	71.4	565
12/05/2021	09:21:42	21.1	71.4	565
12/05/2021	09:21:44	21.1	71.5	571
12/05/2021	09:21:47	21.1	71.5	578
12/05/2021	09:21:50	21	71.5	578
12/05/2021	09:21:53	21	71.5	584
12/05/2021	09:21:56	21	71.5	591
12/05/2021	09:21:59	21	71.5	591
12/05/2021	09:22:02	21	71.6	591
12/05/2021	09:22:05	21	71.6	597
12/05/2021	09:22:08	21	71.6	603
12/05/2021	09:22:11	21	71.6	603
12/05/2021	09:22:14	21	71.7	606
12/05/2021	09:22:17	21	71.7	610

Para que haya concordancia de datos, el funcionamiento de este sensor era todos los días de 8:00 am a 6:00 pm, de igual manera por un periodo de un mes (del 17 de abril al 17 de mayo del 2021). Más adelante, se hablará del análisis de datos que se extrajo de los reportes del sensor.

5.2 ESTUDIO DE TRÁFICO VEHICULAR

Una cámara permitió grabar el tránsito vehicular que fluía en cada una de las estaciones (ver figura 64).



Figura 64. Grabación del tráfico vehicular - Estación 04, 28/04/2021.

Fuente: Elaboración propia.

La finalidad de estas grabaciones fue para el estudio de tráfico vehicular de la vía donde se encontraban las estaciones de la investigación. Previo al conteo vehicular se identificó los vehículos y se segmentó de acuerdo a su tipología (ver figura 65) con la finalidad de que más adelante se determine con mayor exactitud los efectos que tiene el tránsito vehicular en las concentraciones del aire. Para ello, se referenció de la categorización del MTC, teniendo en cuenta sobre todo las características relacionadas con las dimensiones (MTC, 2006)

MOTO(MOTOTAXI/LINEAL)	A
AUTOS	B
CAMIONETAS	C
COMBI	D
MICRO(COUSTER)	E
BUS	F
BUS INTERPROV	G
CAMION	H
VOLQUETES	I

Figura 65. Tipología de Vehículos.

Fuente: Elaboración propia.

Este estudio se hizo por un periodo de un mes (del 17 de abril al 17 de mayo del 2021) de manera diaria de 8:00 am a 6:00 pm. De estas 10 horas de grabación,

se extraían la fracción de los primeros 5 minutos de cada hora grabada, de tal manera que una vez que se tenía el estudio de tráfico vehicular de estos 5 minutos (ver tabla 7), se multiplicaba el resultado por 12, pues 5 minutos es la 12va parte de una hora (ver tabla 8).

Tabla 7. Registro de tráfico vehicular – Estación 03, 10/05/2022.

(En un lapso de 5 minutos)

Fuente: Elaboración propia

Fecha	Intervalo	Tipo A	Tipo B	Tipo C	Tipo D	Tipo E	Tipo F	Tipo G	Tipo H	Tipo I	Total
Lunes 10/05/2021	8:00 - 9:00	35	9	10	1	1	1	1	2	1	61
	9:00 - 10:00	34	9	6	3	1	0	0	3	5	61
	10:00 - 11:00	34	7	8	2	1	0	0	2	2	56
	11:00 - 12:00	48	14	6	2	0	0	1	2	5	78
	12:00 - 13:00	44	7	6	4	0	0	0	2	4	67
	13:00 - 14:00	34	17	8	2	0	0	2	3	4	70
	14:00 - 15:00	30	8	9	2	0	0	1	4	2	56
	15:00 - 16:00	33	9	8	5	0	0	1	4	1	61
	16:00 - 17:00	33	4	11	2	0	0	2	8	2	62
17:00 - 18:00	27	11	8	3	0	0	0	5	8	62	

Tabla 8. Registro de tráfico vehicular – Estación 03, 10/05/2022.

(multiplicando por 12 para llegar a 1 hora)

Fuente: Elaboración propia

Fecha	Intervalo	Tipo A	Tipo B	Tipo C	Tipo D	Tipo E	Tipo F	Tipo G	Tipo H	Tipo I	Total
Lunes 10/05/ 2021	8:00 - 9:00	420	108	120	12	12	12	12	24	12	732
	9:00 - 10:00	408	108	72	36	12	0	0	36	60	732
	10:00 - 11:00	408	84	96	24	12	0	0	24	24	672
	11:00 - 12:00	576	168	72	24	0	0	12	24	60	936
	12:00 - 13:00	528	84	72	48	0	0	0	24	48	804
	13:00 - 14:00	408	204	96	24	0	0	24	36	48	840
	14:00 - 15:00	360	96	108	24	0	0	12	48	24	672
	15:00 - 16:00	396	108	96	60	0	0	12	48	12	732
	16:00 - 17:00	396	48	132	24	0	0	24	96	24	744
17:00 - 18:00	324	132	96	36	0	0	0	60	96	744	

5.3 ANÁLISIS DE DATOS

5.3.1 Datos meteorológicos

En paralelo a la exposición de los dispositivos bioabsorbentes, se midieron parámetros meteorológicos por todo el periodo de exposición (un mes); de ello, se obtuvieron los promedios por cada estación (ver tabla 9).

Tabla 9. Datos meteorológicos medidos.

Fuente: Elaboración propia.

Estación	Temperatura (°C)	Humedad (%)	V. Viento (m/s)
1 Pta 4 UNI	21	74	1.4
2 FIC UNI	21	72	1.4
3 Huarmey	23	76	2.1
4 Av. Amezaga (UNMSM)	23	76	1.8
5 Ancón	25	62	1.7

Sin embargo, la temperatura tiende a ser constante para cada una de las estaciones, puesto que no hay tanta variación entre cada una de ellas, lo mismo sucede con la humedad. Entonces, para la relación con los otros datos recopilados no será relevante compararlos, es por ello que de los datos meteorológicos sólo tendremos en cuenta la velocidad del viento (ver tabla 10), para ello lo normalizamos con el mayor valor que es de la estación 3: 2.1 m/s.

Tabla 10. Datos meteorológicos definitivos.

Fuente: Elaboración propia.

Estación	V. Viento (m/s)	V. Viento normalizado
1 Pta 4 UNI	1.4	0.67
2 FIC UNI	1.4	0.67
3 Huarmey	2.1	1.00
4 Av. Amezaga (UNMSM)	1.8	0.86

5 Ancón	1.7	0.81
-------------------	-----	------

5.3.2 Flujo vehicular

A continuación, se presenta el flujo vehicular por estación, teniendo en cuenta la tipología vehicular (ver tabla 11).

Tabla 11. Flujo vehicular.

Fuente: Elaboración propia.

Estación	Tipología Vehicular									Flujo total
	A molo	B auto	C camioneta	D combi	E microbús	F bus	G Bus Interp.	H camión	I volquete	
1 Pta 4 UNI	3600	15360	26400	4320	2160	2400	41	960	81	55322
2 FIC UNI	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
3 Huarmey	4572	1044	1102	265	60	15	70	584	817	8529
4 Av. Amezaga (UNMSM)	1754	7261	907	209	968	563	36	443	75	12217
5 Ancón	676	130	23	9	12	-	-	24	1	876

Sin embargo, cada vehículo emite cantidades distintas de contaminantes, esto hace que la cantidad de vehículos no pueda ser el dato definitivo para relacionar con otros datos. Es por ello que, partiendo de la tipología vehicular propuesta, se buscó el consumo de combustible promedio de cada tipo de vehículo analizado (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, 2006) como se puede ver en la siguiente tabla (ver tabla 12). Además, se normalizó respecto al mayor valor que es la del volquete: 38.00 litro/100km.

Tabla 12. Consumo de Combustible de vehículos y su normalización.

Fuente: Elaboración propia.

	A moto	B auto	C camioneta	D combi	E microbús	F bus	G Bus Interp.	H camión	I volquete
Consumo litro/100km	4.40	7.60	9.00	14.00	16.00	24.00	28.00	30.00	38.00
Normalizado	0.1	0.2	0.2	0.4	0.4	0.6	0.7	0.8	1.0

Así, se obtuvo la cantidad de vehículos normalizados (ver tabla 13) multiplicando el flujo vehicular de la tabla 11, por el factor de normalización de la tabla 12.

Tabla 13. Cantidad de vehículos normalizados.

Fuente: Elaboración propia.

Estación	vehículos normalizados									Flujo total
	A moto	B auto	C camioneta	D combi	E microbús	F bus	G Bus	H camión	I volquete	
1 Pta 4 UNI	417	3,072	6,253	1,592	909	1,516	30	758	81	14,627
2 FIC UNI	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
3 Huarney	529	209	261	98	25	9	52	461	817	2,461
4 Av. Amezaga (UNMSM)	203	1,452	215	77	408	356	27	350	75	3,162
5 Ancón	78	26	5	3	5	-	-	19	1	138

5.3.3 Metales pesados acumulados

Después del primer mes de exposición de los dispositivos biomonitores, se llevó al laboratorio para ser analizados mediante el ensayo "Espectrofotometría de absorción atómica en llama". Este análisis fue hecho para cada metal (arsénico, cadmio, cobre, cobalto, cromo, níquel, plomo, zinc) en cada una de las 05 estaciones existentes de la investigación, permitiendo medir la cantidad de metales pesados que han acumulado en un mes (Mes 1). Previamente, se hizo este mismo ensayo, pero con los musgos sin haber sido expuestos al tráfico

vehicular, lo cual representa una condición inicial (Mes 0). Los resultados rebelaron que la variación de concentraciones de metales pesados aumentó significativamente (ver tabla 14).

Tabla 14. Concentración de metales pesados por estación (mg/kg).

Fuente: Elaboración propia.

Cod.	Estación	Metal	Mes 0 (natural)	Mes 1 (Abr-May)
1	Pla.4 UNI	Arsénico (As)	0.02	17.00
		Cadmio (Cd)	1.40	2.86
		Cobre (Cu)	6.80	50.20
		Cobalto (Co)	3.20	4.90
		Cromo (Cr)	0.50	2.30
		Níquel (Ni)	1.50	10.50
		Plomo (Pb)	3.30	31.70
		Zinc (Zn)	27.00	229.00
2	FIC UNI	Arsénico (As)	0.02	19.00
		Cadmio (Cd)	1.40	3.70
		Cobre (Cu)	6.80	35.10
		Cobalto (Co)	3.20	5.10
		Cromo (Cr)	0.50	2.30
		Níquel (Ni)	1.50	10.20
		Plomo (Pb)	3.30	24.40
		Zinc (Zn)	27.00	153.00
3	Huarmey	Arsénico (As)	0.02	18.00
		Cadmio (Cd)	1.40	3.29
		Cobre (Cu)	6.80	53.50
		Cobalto (Co)	3.20	7.00
		Cromo (Cr)	0.50	4.40
		Níquel (Ni)	1.50	12.70
		Plomo (Pb)	3.30	27.80
		Zinc (Zn)	27.00	267.00
4	Av. Amezaga (UNMSM)	Arsénico (As)	0.02	23.00
		Cadmio (Cd)	1.40	4.33
		Cobre (Cu)	6.80	64.40
		Cobalto (Co)	3.20	6.30
		Cromo (Cr)	0.50	2.20
		Níquel (Ni)	1.50	14.20
		Plomo (Pb)	3.30	26.40
		Zinc (Zn)	27.00	494.00
5	Ancón	Arsénico (As)	0.02	21.00
		Cadmio (Cd)	1.40	2.89
		Cobre (Cu)	6.80	30.00
		Cobalto (Co)	3.20	4.60
		Cromo (Cr)	0.50	1.50
		Níquel (Ni)	1.50	8.80
		Plomo (Pb)	3.30	22.00
		Zinc (Zn)	27.00	199.00

De la tabla 14, puede notarse las variaciones significativas que han tenido las concentraciones de los metales en la exposición de un mes, un ejemplo claro de ello es el arsénico que llegó a tener más de 1,000 veces su concentración inicial en la mayoría de las estaciones. Sin embargo, no se puede deducir que es directamente por el tráfico vehicular, puesto que existen otros focos contaminantes en mayor intensidad que emiten arsénico, como son las chimeneas que lo eliminan en forma de polvo fino.

De igual manera, se muestran los gráficos comparativos de las concentraciones de los metales en cada una de las estaciones:

- Respecto al arsénico (ver figura 66), a un mes de exposición se tuvo una mayor concentración en la estación 04 (Av. Amezaga - UNMSM). Por otro lado, al estar más alejado al tráfico vehicular, se espera que la estación 02 (FIC UNI) tenga menor concentración que la estación 01 (Puerta 04 UNI); sin embargo, no sucede ello en el caso del arsénico, esto puede deberse a que cerca a la estación 02 existe un foco contaminante distinto al enfoque de la investigación, que emita concentraciones de este metal.

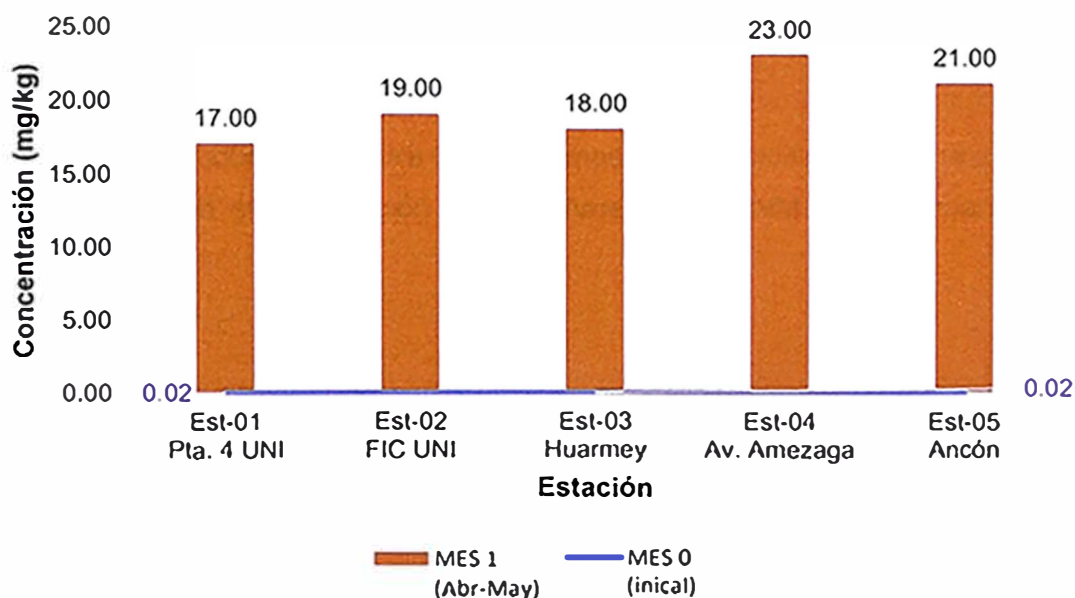


Figura 66. Gráfica de concentraciones del arsénico.

Fuente: Elaboración propia.

- Respecto al cadmio (ver figura 67), a un mes de exposición se tuvo una mayor concentración en la estación 04 (Av. Amezaga - UNMSM), de la misma manera

que el cadmio, la estación 02 (FIC UNI) tiene mayor concentración que la estación 01 (Puerta 04 UNI), esto puede deberse a que cerca a la estación 02 existe un foco contaminante distinto a las emisiones vehiculares que emita concentraciones de cadmio.

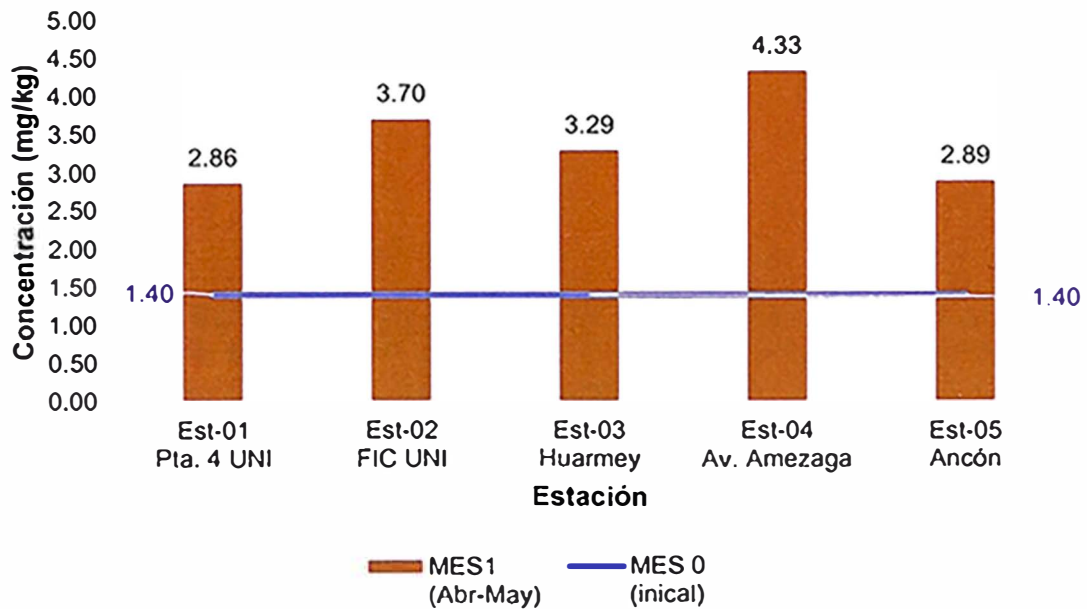


Figura 67. Gráfica de concentraciones del cadmio.

Fuente: Elaboración propia.

- Respecto al cobre (ver figura 68), a un mes de exposición se tuvo una mayor concentración en la estación 04 (Av. Amezaga - UNMSM); en cuanto a la

estación 01 (Puerta 04 UNI), tiene mayor concentración que la estación 02 (FIC UNI) la cual tiene relación con la proximidad al tráfico vehicular.

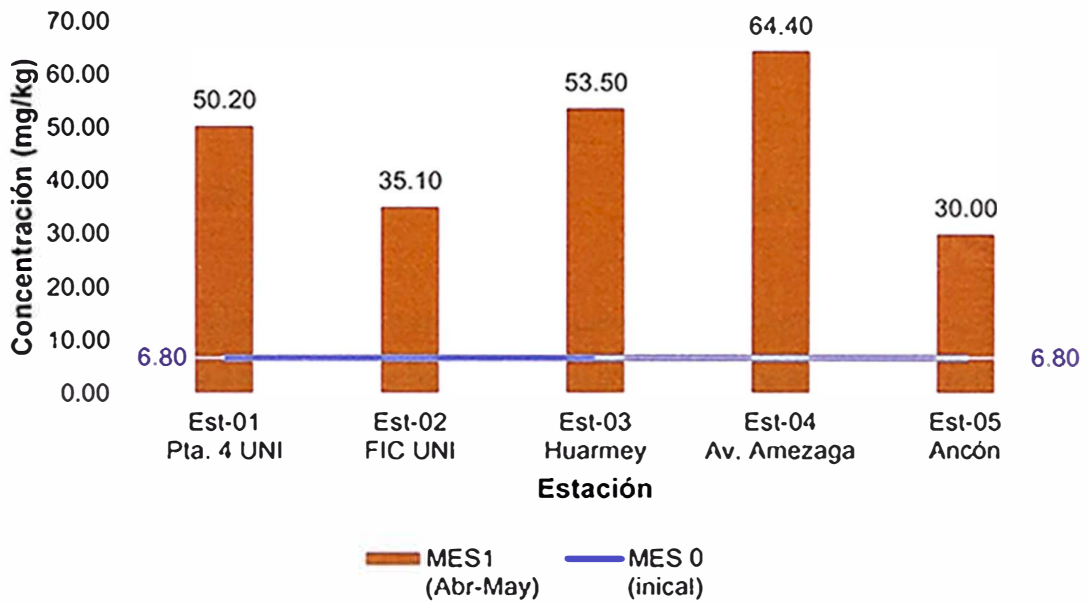


Figura 68. Gráfica de concentraciones del cobre.

Fuente: Elaboración propia.

- Respecto al cobalto (ver figura 69), a un mes de exposición se tuvo una mayor concentración en la estación 03 (Huarmey), y una concentración próxima entre la estación 01 y la estación 02.

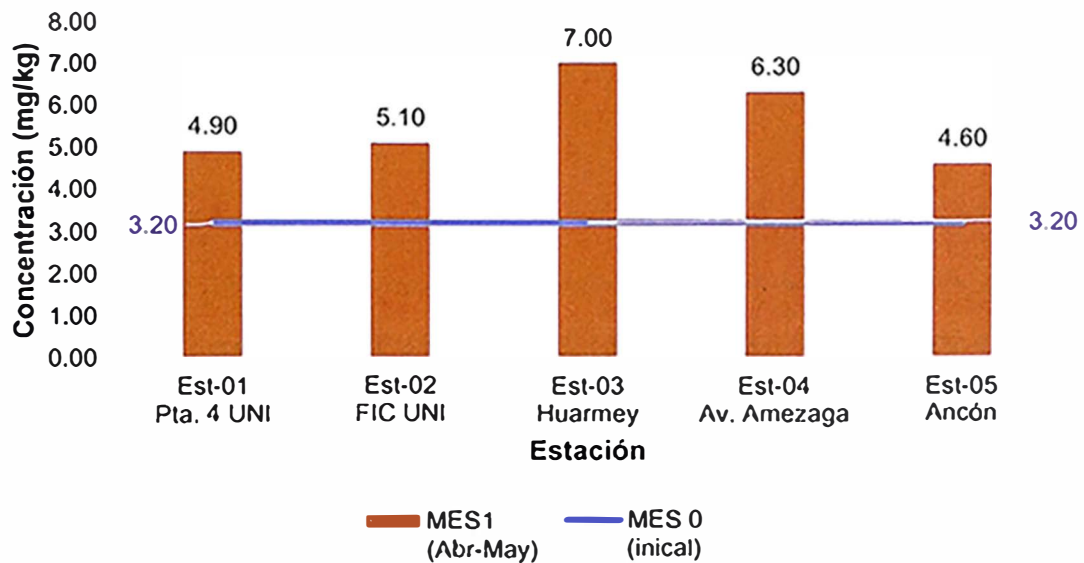


Figura 69. Gráfica de concentraciones del cobalto.

Fuente: Elaboración propia.

- Respecto al cromo (ver figura 70), a un mes de exposición, en la estación 03 (Huarmey) se tuvo una concentración al doble respecto a las otras estaciones, y una concentración próxima entre la estación 01 y 02.

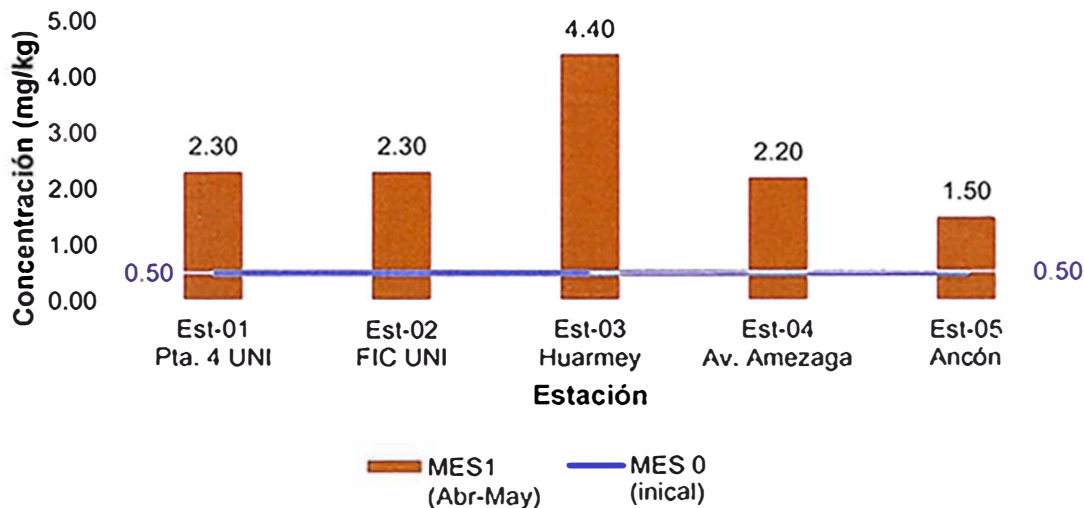


Figura 70. Gráfica de concentraciones del cromo.

Fuente: Elaboración propia.

- Respecto al níquel (ver figura 71), a un mes de exposición, es la estación 04 (Av. Amezaga - UNMSM) donde se tuvo una mayor.

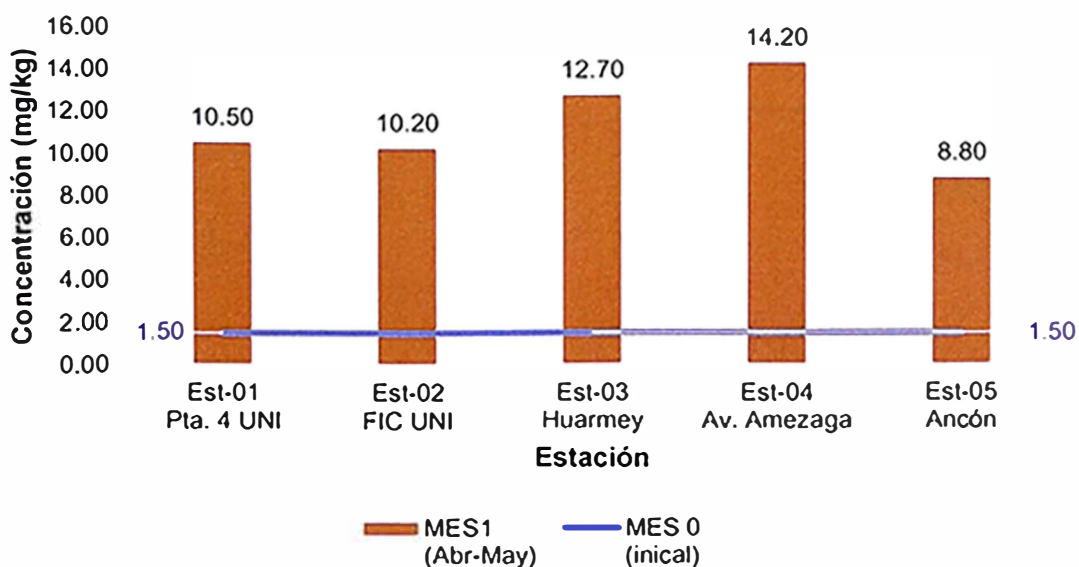


Figura 71. Gráfica de concentraciones del níquel.

Fuente: Elaboración propia.

- Respecto al plomo (ver figura 72), a un mes de exposición, las concentraciones de cada estación tienen una mejor aproximación a una relación directa con el tráfico vehicular.

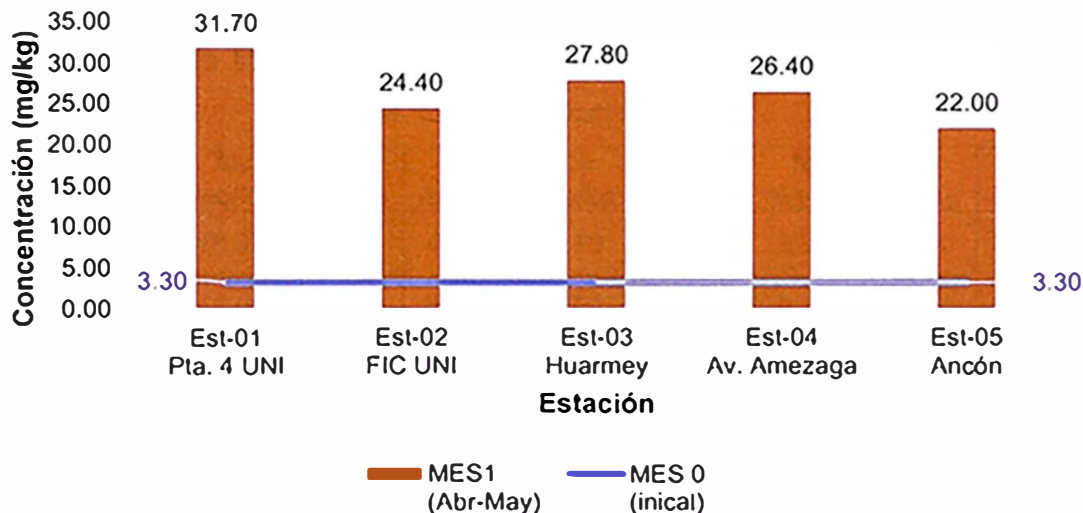


Figura 72. Gráfica de concentraciones del plomo.

Fuente: Elaboración propia.

- Respecto al zinc (ver figura 73), a un mes de exposición, una concentración de gran magnitud en la estación 04 (Av. Amezaga - UNMSM) respecto a las demás estaciones.

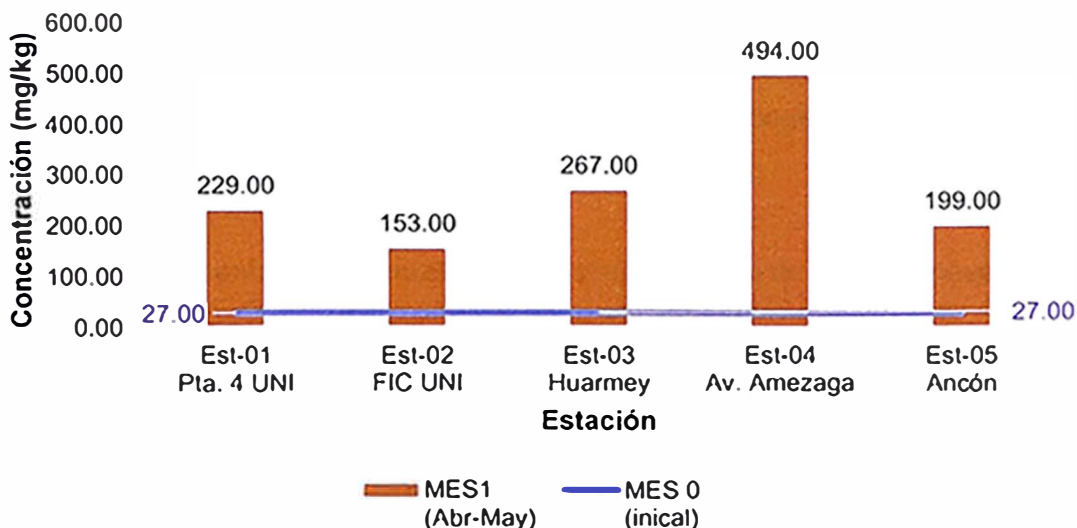


Figura 73. Gráfica de concentraciones del zinc.

Fuente: Elaboración propia.

Las diferencias entre las mediciones representan la cantidad de metales que ha acumulado el dispositivo durante 1 mes completo; entonces, es necesario registrar las variaciones de las concentraciones (ver tabla 15) para que posteriormente se hallen relaciones con otros parámetros.

Tabla 15. Metales pesados acumulados (Mes 1 - Mes 0).

Fuente: Elaboración propia

Estación	As mg/kg	Cd mg/kg	Cu mg/kg	Co mg/kg	Cr mg/kg	Ni mg/kg	Pb mg/kg	Zn mg/kg
1 Pta 4 UNI	16.98	1.46	43.40	1.70	1.80	9.00	28.40	202.00
2 FIC UNI	18.98	2.30	28.30	1.90	1.80	8.70	21.10	126.00
3 Huarmey	17.98	1.89	46.70	3.80	3.90	11.20	24.50	240.00
4 Av. Amezaga (UNMSM)	22.98	2.93	57.60	3.10	1.70	12.70	23.10	467.00
5 Ancón	20.98	1.49	23.20	1.40	1.00	7.30	18.70	172.00

De la tabla 15, a primera vista se ve que algunos de estos metales tienden a mantener la misma concentración en todas las estaciones indiferentemente que tengan alta demanda vehicular o no. Entonces, como paso previo a la relación de todos los datos, se identificó cuáles son los metales que mantienen una tendencia de relación con el tráfico vehicular, ya que es con esos metales que se hará la relación con los demás parámetros.

Para ello se normalizó las concentraciones de cada metal de la tabla 15, con la finalidad de identificar las mayores desviaciones, y así escoger los metales que se utilizarán para el siguiente paso de análisis (ver tabla 16).

Tabla 16. Concentración normalizada de concentración de metales pesados.

Fuente: Elaboración propia.

Estación	As mg/kg	Cd mg/kg	Cu mg/kg	Co mg/kg	Cr mg/kg	Ni mg/kg	Pb mg/kg	Zn mg/kg
1 Pta. UNI	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2 FIC UNI	1.12	1.58	0.65	1.12	1.00	0.97	0.74	0.62
3 Huarmey	1.06	1.29	1.08	2.24	2.17	1.24	0.86	1.19

4 Av. Amezaga (UNMSM)	1.35	2.01	1.33	1.82	0.94	1.41	0.81	2.31
5 Ancón	1.24	1.02	0.53	0.82	0.56	0.81	0.66	0.85

Verificando la desviación de los metales en la tabla 16, se decidió trabajar en la relación de datos con los metales: cobre (Cu), Cobalto (Co), Níquel (Ni), Plomo (Pb) y zinc (Zn).

Respecto a los otros metales no se evidencia una correlación lo cual hace suponer que existen más variables urbanas distintas a las contabilizadas en este estudio, por ejemplo, en la estación 4 (Puerta 3 de la UNMSM) está rodeado de áreas industriales tales como Nestlé, Donofrio, Field, Molitalia y entre otras variedades de fábricas que va desde ropas hasta metales en un radio de 1 kilómetro, o por ejemplo en la estación 3 (Panamericana Norte - Huarney) está a 7 kilómetros del Puerto Punta Lobitos de Antamina, que es dónde se hace parte del tratamiento a los minerales y desembocan para ser exportados.

Sin embargo, como registro en la siguiente gráfica (ver figura 74) se muestran los metales pesados ordenadas de mayor a menor de acuerdo con su peso atómico y como ordenadas su mayor y menor concentración registrada a lo largo de todo el periodo de exposición.

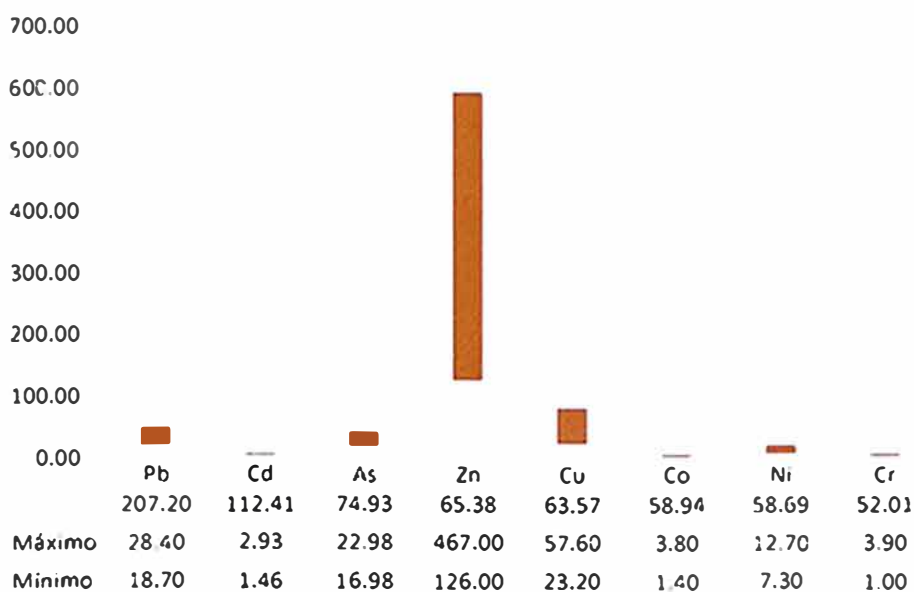


Figura 74. Concentraciones mayores y menores de los metales pesados.

Fuente: Elaboración propia.

5.3.4 Partículas retenidas por los ficus

Respecto a las concentraciones de partículas en las hojas de ficus y su respectivo diámetro de tronco, cuya recolección de datos se hizo en las 03 primeras estaciones a inicios de la investigación, a continuación, se presenta la tabla resumen de esta recolección de datos (ver tabla 17).

Tabla 17. Información de ficus expuestos.

Fuente: Elaboración propia.

Zona	Concentración polvo (gr/m ²)	Diámetro de troncos (cm)	Distancia a fuente (m)
1	30.30	39.20	10.00
2	6.06	20.40	250.00
3	24.24	33.10	5.00

5.3.5 Relación de datos

De manera general, se tienen los siguientes datos (ver tabla 18).

Tabla 18. Datos recopilados a relacionar.

Fuente: Elaboración propia.

Datos a relacionar		Cantidad
Datos de entrada (14)	Diámetro de los ficus	1
	Concentración de polvo en las hojas de los ficus	1
	Distancia a una vía de alta congestión vehicular	1
	Velocidad del viento	1
	Cantidad de vehículos normalizados según cada tipología (A, B, C, D, E, F, G, H, I) y el total	10
Datos de salida (5)	Los 8 metales pesados absorbidos (Cu, Co, Ni, Pb, Zn)	5

Para la relación de datos, se tienen 2 conjuntos:

- El primer conjunto de datos corresponde solo a las 3 primeras estaciones (Puerta 4 UNI, FIC-UNI, Huarmey), cuyos datos de entrada son todos los registrados en la tabla 18 (14 variables en total) y cuyos datos de salida son los 5 metales pesados mencionados (5 variables).
- El segundo conjunto de datos corresponde a las 5 estaciones (Puerta 4 UNI, FIC-UNI, Huarmey, Av. Amezaga - UNMSM, Ancón), cuyos datos de entrada

son la velocidad del viento de cada una de las zonas, así como los niveles de flujo vehicular según cada tipología vehicular (11 variables en total). Y los datos de salida los 5 metales pesados mencionados (5 variables).

El objetivo del análisis es identificar si existe alguna relación directa entre algunas de las variables de entrada respecto a las variables de salida. Para dicho fin, se generarán modelos lineales con la combinación de las variables de entrada y salida, obteniéndose el correspondiente valor del R^2_{aj} en cada caso. Considerando la limitada muestra de datos, la investigación no tendrá la finalidad de realizar predicciones con los modelos, tampoco de poder interpretar las ecuaciones de regresión que se generen. La investigación se enfocará solo a buscar buenas correlaciones que demuestren que si existiría una tendencia a relacionar ciertas variables de entrada con algunas de salida. Por tal motivo, tampoco se ahondará en modelos con transformaciones de las variables (cuadrados, cúbicos, etc.), y tampoco se trabajarán con otro tipo de algoritmos.

A continuación, se presenta la correlación del primer conjunto de datos, los que tienen una mayor proximidad a 1 son los que más relacionados se encuentran (ver tabla 19).

Tabla 19. Correlación del primer conjunto de datos.

Fuente: Elaboración propia.

Metal	Concentración polvo	Diámetro troncos	Distancia a fuente	Vel. Viento Normalizado	A moto	B auto	C camioneta	D combis	E micros	F bus	G bus interp.	H camión	I volquete	Flujo total
Cu	0.840	0.776	0.977	0.408	0.999	0.163	0.146	0.158	0.137	0.124	0.936	0.710	0.497	0.240
Co	0.037	0.013	0.193	0.993	0.357	0.272	0.294	0.278	0.305	0.323	0.576	0.001	0.969	0.191
Ni	0.145	0.093	0.368	0.988	0.551	0.119	0.135	0.123	0.144	0.157	0.760	0.054	1.000	0.064
Pb	0.901	0.944	0.699	0.002	0.519	0.831	0.813	0.827	0.803	0.788	0.303	0.973	0.003	0.897
Zn	0.703	0.627	0.904	0.571	0.983	0.062	0.051	0.059	0.045	0.038	0.992	0.553	0.659	0.116

De igual manera, se presenta la correlación del segundo conjunto de datos (ver tabla 20).

Tabla 20. Correlación del segundo conjunto de datos.

Fuente: Elaboración propia.

Metal	Vel. Viento Normalizado	A moto	B auto	C camioneta	D combis	E micros	F bus	G bus interp.	H camión	I volquete	Flujo total
Cu	0.175	0.351	0.257	0.033	0.039	0.225	0.103	0.574	0.434	0.135	0.141
Co	0.670	0.345	0.020	0.110	0.099	0.033	0.081	0.638	0.082	0.654	0.028
Ni	0.313	0.185	0.033	0.027	0.022	0.022	0.001	0.453	0.144	0.191	0.001
Pb	0.010	0.601	0.694	0.680	0.696	0.671	0.687	0.495	0.928	0.087	0.800
Zn	0.191	0.038	0.084	0.019	0.015	0.070	0.003	0.164	0.077	0.005	0.003

Ahora, para que se facilite la identificación de correlaciones aptas, se define que los R^2 mayor o igual a 0.6 tendrán un valor de 1, y las menores tendrán un valor de 0. Entonces las tablas quedan de la siguiente manera.

Tabla 21. Identificación de la correlación de datos – primer conjunto de datos.

Fuente: Elaboración propia.

	Concentración polvo	Diámetro tronco	Distancia fuente	Vel. Viento Normalizado	A moto	B auto	C camioneta	D combis	E micros	F bus	G bus interp.	H camión	I volquete	Flujo total	Cantidad de relaciones
Cu	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	6
Co	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	2
Ni	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	3
Pb	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	1	0	1	10
Zn	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	6
	3	3	3	2	2	1	1	1	1	1	3	2	3	1	

Respecto al primer conjunto de datos, de acuerdo con la tabla 21, se puede ver que son el Pb, Cu y Zn los que reflejan las mejores correlaciones con las variables independientes, especialmente con la concentración de polvo, diámetro de tronco y la distancia a la fuente.

Respecto al segundo conjunto de datos, de acuerdo con la tabla 22 se puede ver que solo el Pb refleja una buena correlación con las variables independientes. Además, tiene una buena relación con la tipología de vehículos.

Tabla 22. Identificación de correlación de datos – segundo conjunto de datos.

Fuente: Elaboración propia.

	Vel. Viento Normalizado	A moto	B auto	C camioneta	D combis	E micros	F bus	G bus interpr.	H camión	I volquete	Flujo total	Cantidad de relaciones
Cu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Co	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	3
Ni	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pb	0	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	8
Zn	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	

5.3.6 Explicación de resultados

De Silva et al. (2021) indica que, si bien ya no se fabrican vehículos que emiten plomo, todavía persiste en los vehículos antiguos y en el propio ambiente por su uso histórico, su falta de degradación y su baja movilidad. Asimismo, el plomo no solamente se origina por el uso del combustible, sino que también por el desgaste de los frenos, el desgaste de los neumáticos y el uso del aceite del motor. En ese sentido, las buenas correlaciones que se identificaron entre la presencia vehicular con el metal pesado Pb reflejarían la explicación anterior.

Analizando a más detalle los resultados de las concentraciones de plomo en todas las estaciones, se ha generado un gráfico de dispersión entre el flujo normalizado y las concentraciones de plomo (ver figura 75).

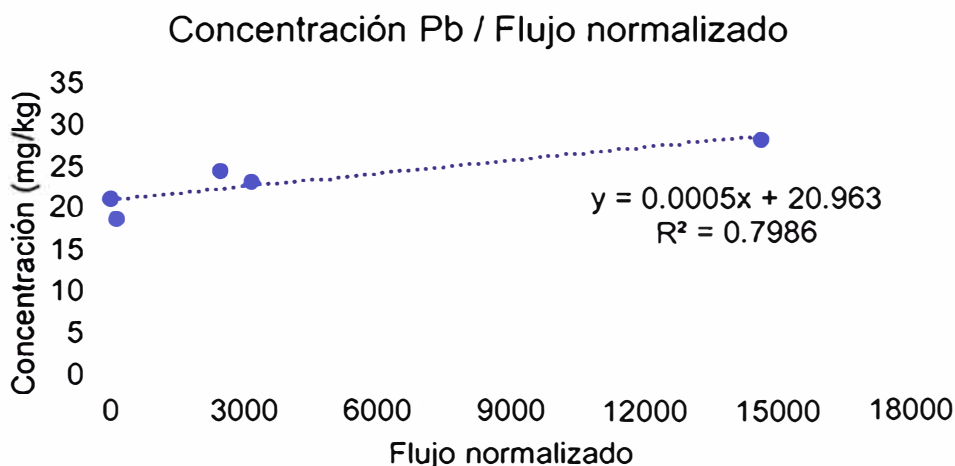


Figura 75. Concentración del Pb vs Flujo normalizado.

Fuente: Elaboración propia.

Del gráfico anterior se puede interpretar que en zonas con alta congestión vehicular o poca congestión vehicular, la ciudad ya está aportando una concentración inicial de 20 mg/kg/mes como resultado de toda la contaminación urbana. Además, de forma localizada, conforme va aumentando la congestión vehicular, puede aumentar hasta un 50% las concentraciones de plomo.

5.4 COMPARATIVO DE COSTOS

Como parte del contraste entre el dispositivo propuesto y los aparatos instalados en las Estaciones de la Calidad del Aire (estaciones parte de la Red de Monitoreo Automático de la Calidad del Aire - REMCA) se ha generado un comparativo de costos de los equipos.

- Presupuesto de una esfera de musgo instalado en todo su periodo de monitoreo (ver Tabla 23).

Tabla 23. Costo de componentes.

Fuente: Elaboración propia.

Componente	Unidad	Cantidad	Costo Unitario	Costo Parcial Total
Colador	Und	2	S/ 5.00	S/ 10.00
Bola de tecnopor	Und	1	S/ 1.50	S/ 1.50
Musgo blanco (Sphagnum Moss)	Kg	0.05	S/ 20.00	S/ 1.00
Mondadientes	Und	12	S/ 0.10	S/ 1.20
Cintas de seguridad	Und	6	S/ 0.20	S/ 1.20

Equipo venoclisis	Und	1	S/ 1.50	S/ 1.50
Tubo EMT 1/2"	Und	1	S/ 7.50	S/ 7.50
Recipiente 5L (reciclado)	Und	1	S/ 0.00	S/ 0.00
Servicio de Análisis de Musgo (por ensayo)	Und	1	S/ 280.00	S/ 280.00
Total				S/ 303.90

- Para estaciones de monitoreo de la calidad del aire como Puente Piedra, Carabayllo, San Martín de Porres, Huachipa y San Juan de Lurigancho está equipado con la Thermo Beta 5014i (máquina que permite medir PM10, PM 2.5), Teledyne 200T (máquina que permite medir NO₂), Teledyne 300T (máquina que permite medir SO₂ & CO) y la Teledyne 400T (máquina que permite medir O₃) (Sánchez Ccoyllo & Ordóñez Aquino, 2016).

A continuación, se muestran los costos de cada máquina que conforma las estaciones de monitoreo (ver Tabla 24).

Tabla 24. Costo de equipos de medición.

Fuente: Elaboración propia.

Equipo	Parámetro	Costo por máquina
Thermo Beta 5014i	PM10, PM 2.5	S/ 14,804.00
Teledyne 200T	NO ₂	S/ 24,050.00
Teledyne 300T	SO ₂ , CO	S/ 24,000.00
Teledyne 400T	O ₃	S/ 16,650.00
Total		S/ 79,504.00

De la tabla 23 y tabla 24, se puede ver la notable diferencia en monto global en costos entre implementar una estación sofisticada como la del REMCA (79,504.00 soles) y la de implementar una estación de esta investigación (303.90 soles). La diferencia es de 79,200.10 soles, esto considerando sólo una estación en ambos casos (en Lima, de acuerdo con los boletines de vigilancia de la calidad del aire proporcionada por el Senamhi, existen 10 estaciones pertenecientes al REMCA).

Si bien es cierto, se trata de parámetros distintos entre estos tipos de estaciones, se debe tener en cuenta que todos ellos son indicadores de la

calidad del aire en el medio. Algo importante en este comparativo es que las estaciones sofisticadas del REMCA no tienen equipos que midan concentraciones de metales pesados, una gran limitación ya que en la tabla 9 se ven cambios abruptos en la concentración de metales pesados, entonces son parámetros que no se deben perder de vista.

Por último, considerando un periodo de análisis de musgo de un mes con la finalidad de obtener las concentraciones mensuales, generaría un costo mensual de 293.40 soles (monto sin considerar el Tubo EMT 1/2", puesto que ésta queda instalada permanentemente) entonces quedaría en evaluar la comparación con los costos mensuales y de mantenimiento de las máquinas sofisticadas actuales.

CONCLUSIONES

- Con las mediciones tanto cualitativas y cuantitativas hechas a las plantas de ficus, tanto cercanas como lejanas a las vías de alto tráfico vehicular, se pudo determinar la relación entre su ubicación y la calidad de la vegetación aledaña. Con ello, se valida la primera hipótesis específica.
- Realizando la comparación entre la concentración de metales pesados que tuvo la especie de musgos inicialmente, respecto a la identificada en el dispositivo luego de un mes de exposición en cada zona de estudio, se identificó que sí logró captar la presencia de metales pesados en el aire. Por ello, se valida que la especie de musgos *Sphagnum Moss* sirve para biomonitorizar la calidad del aire. Además, se valida la segunda hipótesis específica.
- Respecto a la comparación de la concentración de metales pesados, para la presencia de polvo en las hojas de los *Ficus* cercanos a cada estación, el diámetro promedio de los troncos y la distancia a una vía de alta congestión vehicular, se pudo identificar buenos valores de correlación lineal en la mayoría de los metales pesados medidos. Por ello, se considera que estos metales pesados afectarían a la calidad de las especies vegetales cercanas.
- En cuanto a los parámetros meteorológicos, no se identificó una relación directa con la concentración de metales pesados. En ese sentido, su aporte no sería significativo y no se validaría la tercera hipótesis específica.
- Realizando la comparación entre la presencia vehicular cuantificada en cada estación respecto a la concentración de metales pesados, se logró identificar una buena correlación especialmente con el metal pesado Plomo (Pb). Si bien su presencia ya no es permitida en el combustible, este resultado podría explicarse ya que este persiste en el ambiente por su uso en el pasado, su falta de degradación y baja movilidad. Asimismo, porque su generación también puede deberse al desgaste de los frenos, el desgaste de los neumáticos y el uso del aceite del motor. De esta manera, se valida la cuarta hipótesis específica.
- Con las conclusiones anteriores, se logra validar la hipótesis general de la tesis, se valida el dispositivo biomonitor propuesto, verificando que su concentración cambia con la presencia vehicular y la distancia a la fuente.

RECOMENDACIONES

- Los musgos se encuentran en mayor variedad y abundancia a mayor altitud, además que por lo general están expuestos a menores focos contaminantes (Tráfico vehicular, fábricas, etc.). Sin embargo, su adaptación a climas distintos puede ser complicada para la mayoría de las variedades, es por ello que es necesario tener ensayos de adaptación y/o revisión de referencias que hablen de la adaptación de musgos en diferentes climas.
- Para el dispositivo propuesto y otros similares, se debe trabajar con un sistema de riego conformado por tuberías de $\frac{1}{2}$ " o menores, como las mangueras del equipo de venocllisis. Tener en cuenta que emiten una gota cada 1.44 segundos aproximadamente, con lo cual se llegará a abastecer de 3 litros de agua fluida por 24 horas.
- El estudio de tráfico vehicular se hizo desde las 8:00 am hasta las 6:00 pm, considerando que el tráfico se masifica en ese intervalo. Sin embargo, antes y después de este intervalo existen horarios con tráfico masivo (7:00 am – 8:00 am, 7:00 pm – 9:00 pm) y para ello se hicieron proyecciones ya que se tenía una limitada nitidez de las cámaras usadas. Entonces, esto se podría superar con estudios que utilicen otros métodos, como grabaciones con drones.
- El ficus es una planta abundante en muchas calles de la ciudad de Lima, característica resaltante por sobre otras especies de plantas, esto le permite ser una buena herramienta para medir retención de partículas suspendidas en el aire.
- Cuando se trate de medir la masa de objetos pequeños como las hojas de una planta, y no se tiene balanzas de precisión, se puede trabajar midiendo la masa de una cantidad considerable y luego dividir entre la cantidad de objetos medidos.
- Cuando se trate de adaptar musgos en ecosistemas distintos a su procedencia, es necesario lo siguiente:
 - ✓ Hacer una revisión bibliográfica profunda sobre las especies de interés, respecto al medio ambiente en el que viven (temperaturas altas y mínimas, abundancia de agua, sustrato, etc.).
 - ✓ Identificar las especies que vivan en medios similares al lugar donde se requiere adaptar.
 - ✓ Es importante que en el lugar donde se desea colocar las muestras, debe haber fuentes de agua cercanas y objetos que generen sombra.

- ✓ Considerarse que el agua es el factor más importante en la adaptación de especies de musgo en ecosistemas diferentes; en ese sentido, debe buscarse la manera de abastecer agua lo más similar posible que en su medio natural (por ejemplo, el flujo de agua).
- ✓ En el transporte de las muestras, se debe tener cuidado con su hermeticidad para que las concentraciones naturales de contaminantes no sean alteradas antes de llegar al punto de estudio.
- Para el sistema de riego, es necesario hacer cálculos exactos, esto permitirá calibrar las salidas de agua y encontrar la cantidad de agua necesaria para mantener las muestras de musgo húmedas.
- Se debe saber que el musgo tiene capacidad de retención de agua de hasta 20 veces su propia masa; en ese sentido, es necesario que el musgo esté seco al momento de colocar al dispositivo para que no se generen alteraciones de cantidades entre un dispositivo y otro.
- Se recomienda codificar los dispositivos, identificando sus estaciones y las fechas de colocación en la estación.
- Indiferentemente de la cantidad de dispositivos por estación, se debe colocar mínimo una muestra extra de contingencia en caso ocurra algún inconveniente con alguno.
- En caso se busque contrastar las concentraciones de metales pesados que retengan los dispositivos con aparatos electrónicos, es necesario tener en cuenta la fuente de energía, ya sea por medio de un tomacorriente o por baterías recargables.
- Se deberían hacer estudios considerando la distancia a la fuente de contaminación (vías con alta concentración de vehículos). Las distancias deberían superar los 200 metros para que en los resultados de las mediciones se pueda notar la diferencia.
- Para investigaciones futuras que tengan relación con concentración de contaminantes en la zona de la UNI se tiene el aporte de las vías de la Panamericana Norte como fuente importante, mientras que en la zona de la Av. Amezaga (UNMSM) se tiene una alta polución ya que está en el centro de una confluencia urbana de gran longitud, además es una zona industrial los cuales podrían estar aportando contaminantes.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arciniégas Suárez, C. A. (2012). Diagnóstico y control de material particulado: Partículas suspendidas totales y fracción respirable PM10. Luna Azul, 195-213.
- Ares, Á., Fernández, J., Caballeira, A., & Aboal, J. (2014). Towards the methodological optimization of the moss bag technique in terms of contaminants concentrations and replicability values. *Atmospheric Environment*, 496-507.
- Asamblea General de las Naciones Unidas. (2015). Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. New York.
- Bedregal, P., Mendoza, P., Ubillús, M., Torres, B., Hurtado, J., Maza, I., & Espinoza, R. (2009). El uso de *Usnea* sp. y *Tillandsia capillaris*, como biomonitores de la contaminación ambiental en la ciudad de Lima, Perú. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 75(4), 479-487.
- Brundtland, G. H. (1987). Informe Brundtland. Comisión Mundial para el Medio Ambiente y el Desarrollo de la ONU, Tokio.
- Chávarri Cueva, L. A., & Falen Solis, J. A. (2020). Propuesta de concreto eco-sostenible. Lima: UPC.
- Fernandez Cañero, R., Pérez, Quevedo, & Franco. (2008). Ajardinamiento de fachadas y jardines verticales. I Simposio Iberoamericano- IV Jornadas Ibéricas de Horticultura Ornamental, (págs. 231-236). Sevilla.
- Frahm, J.-P. (2013). Datos interesantes sobre esteras de musgo. xeroflor.
- Gonzales, G., Zevallos, A., Nuñez, D., Gastañaga, C., Cabezas, C., Naeher, L., . . . Steenland, K. (2014). Contaminación ambiental, variabilidad climática y cambio climático: una revisión del impacto en la salud de la población peruana. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública*.
- Instituto Nacional de Estadística e Informática (2004). Estadísticas Ambientales. Lima.
- Liang Wu, C. d. (29 de junio de 2017). EL ÁRBOL QUE LIMPIA EL AIRE. 39. (B. M. Ciencia, Entrevistador)

- Ministerio del Ambiente (2017). Decreto Supremo N° 003-2017-MINAM. El Peruano.
- Ministerio del Ambiente (2019). Diagnóstico de la Gestión de la Calidad Ambiental del Aire de Lima y Callao. Lima.
- Municipalidad Metropolitana de Lima. (2021). Vigilancia de la Calidad del Aire en Lima Metropolitana. Lima.
- Organización de las Naciones Unidas (2015). Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. Asamblea General de las Naciones Unidas. Nueva York.
- Organización de las Naciones Unidas (2019). Perspectivas del Medio Ambiente Mundial. Cambridge: UN Environment.
- Organización Mundial de la Salud (2018). Campaña: Respira la vida.
- Organización Mundial de la Salud (marzo de 2019). WORLD AIR QUALITY REPORT. IQAir.
- Paredes, Á. U. (2010). Reducción catalítica de óxidos de Nitrógeno en corrientes gaseosas. Mérida/Valencia: UCLM.
- Splittgerber, V., & Saenger, P. (2015). City Tree: A Vertical Plant Wall. En Air Pollution XXIII (págs. 295-304). Sevilla: WITPRESS.
- Sun, S.-Q., Wang, D.-Y., He, M., & Cheng, Z. (2009). Monitoring of atmospheric heavy metal deposition in Chongqing, China-based on moss bag technique. Environmental Monitoring and Assessment 148, 1-9.
- Universidad de la Rioja. (20 de julio de 2015). [www.unirioja.es](https://www.unirioja.es/apnoticias/servlet/Noticias?codnot=3983&accion=detnot). Obtenido de <https://www.unirioja.es/apnoticias/servlet/Noticias?codnot=3983&accion=detnot>
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2006). Directiva N°002-2006-MTC/15
- The Paris Agreement. (2015). United Nations Climate Change Conference