

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA AMBIENTAL



**EFFECTIVIDAD DE DOS TÉCNICAS DE MUESTREO PASIVO DE
PARTICULAS ATMOSFERICAS SEDIMENTABLES DEL AIRE
DURANTE EL PERIODO NOVIEMBRE 2023 – ENERO 2024 EN LAS
INSTALACIONES DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE
LA SELVA**

Tesis

Para optar el título de

INGENIERO AMBIENTAL

PRESENTADO POR:

URBANO MELLADO, GREICY DAYANA

Tingo María – Perú

2026



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS N°032-2026-FRNR-UNAS

Los que suscriben, Miembros del Jurado de Tesis, reunidos con fecha 26 de febrero de 2026, a horas 06:30 p.m. en la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Recursos Naturales Renovables para calificar la tesis titulada:

**“EFECTIVIDAD DE DOS TÉCNICAS DE MUESTREO PASIVO DE PARTICULAS
ATMOSFERICAS SEDIMENTABLES DEL AIRE DURANTE EL PERIODO
NOVIEMBRE 2023 – ENERO 2024 EN LAS INSTALACIONES DE LA UNIVERSIDAD
NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA”**

Presentado por la Bachiller: **URBANO MELLADO, GREICY DAYANA** después de haber escuchado la sustentación y las respuestas a las interrogantes formuladas por el Jurado, se declara **APROBADO** con el calificativo de **“MUY BUENA”**.

En consecuencia, la sustentante queda apto para optar el Título Profesional de **INGENIERO AMBIENTAL** que será aprobado por el Consejo de Facultad, Tramitándolo al Consejo Universitario para el otorgamiento del Título Correspondiente.

Tingo María, 17 de marzo de 2026

Mchlgo. MSc. LUIS ALBERTO SANCHEZ ROMERO
PRESIDENTE

Ing. MSc. ABBY SOLANGE DA CRUZ RODRIGUEZ
MIEMBRO

Ing. MSc. SANDRA LORENA ZAVALA GUERRERO
MIEMBRO



Dr. VICTOR MANUEL BETETA ALVARADO
ASESOR



UNAS

VICERRECTORADO DE
INVESTIGACIÓN

INSTITUTO DE
INVESTIGACIÓN

UNIDAD DE SOPORTE
CIENTÍFICO
REPOSITORIO INSTITUCIONAL

"Decenio de la Igualdad de Oportunidades para Mujeres y Hombres"
"Año de la Esperanza y el Fortalecimiento de la Democracia"

CERTIFICADO DE SIMILITUD T.I. N 105 - 2026 - CS-RIDUNAS

El Jefe de la Unidad de Soporte Científico de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, quien suscribe,

CERTIFICA QUE:

El Trabajo de Investigación; aprobó el proceso de revisión a través del software TURNITIN, evidenciándose en el informe de originalidad un índice de similitud no mayor del 25% y contenido generado por Inteligencia Artificial menor o igual al 20%. Según establece el Art. 29° y 30° del Acuerdo Nro.017-2025-CIUNAS-VRI-UNAS.

Programa de Estudio:

Ingeniería Ambiental

Tipo de documento:

Tesis

X

Trabajo de Suficiencia Profesional

TÍTULO	AUTOR	PORCENTAJE	
		SIMILITUD	CONTENIDO GENERADO POR INTELIGENCIA ARTIFICIAL
EFFECTIVIDAD DE DOS TÉCNICAS DE MUESTREO PASIVO DE PARTICULAS ATMOSFERICAS SEDIMENTABLES DEL AIRE DURANTE EL PERIODO NOVIEMBRE 2023 – ENERO 2024 EN LAS INSTALACIONES DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA	URBANO MELLADO, GREICY DAYANA	05 % Cinco	Menor a 20 %

Tingo María, 30 de marzo de 2026.



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
UNIDAD DE SOPORTE CIENTÍFICO

ING. EINSTEIN A. ORTIZ MORALES
JEFE

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE LA SELVA
FACULTAD DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA AMBIENTAL



**EFFECTIVIDAD DE DOS TÉCNICAS DE MUESTREO PASIVO DE
PARTÍCULAS ATMOSFÉRICAS SEDIMENTABLES DEL AIRE
DURANTE EL PERIODO NOVIEMBRE 2023 – ENERO 2024 EN LAS
INSTALACIONES DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA DE
LA SELVA**

Autor : Bach. Urbano Mellado Greicy Dayana
Asesor : Dr. Víctor Manuel Beteta Alvarado
Área de investigación : Gestión ambiental PICSDS
Grupo de investigación : Gestión ambiental
Línea de investigación : Gestión de la contaminación
Lugar de ejecución : Campus de la Universidad Nacional Agraria de la Selva
Duración : 6 meses
Financiamiento : Propio
Presupuesto : S/. 10433.45

Tingo María – Perú

2026

DEDICATORIA

Consagro este trabajo investigativo, ante todo a Dios, quien me ha otorgado salud, perseverancia y la vitalidad indispensable para finalizar con éxito esta transcendental fase de mi crecimiento profesional.

De manera especial dedico este trabajo a mi asesor Dr. Víctor Beteta, a la Ing. Barbara y al Dr. López por su valiosa orientación, su amplio conocimiento y el compromiso demostrado a lo largo del desarrollo de este trabajo de investigación, los cuales fueron fundamentales para alcanzar el objetivo académico.

A mis progenitores, quienes han representado mi principal inspiración y sostén, les manifiesto mi más sincero reconocimiento por su afecto inagotable, su compromiso inquebrantable y por ofrecerme su apoyo constante en cada etapa de mi trayectoria académica. Su fe en mí, aun en los momentos más desafiantes, actuó como el impulso esencial que me permitió perseverar y lograr mis aspiraciones y por enseñarme que con sacrificio y disciplina todo es posible.

También a mis hermanas y hermano, por sus palabras en esos momentos difíciles y su apoyo que me permitieron seguir, y uno muy especial para mis sobrinos, quienes con su alegría y ternura fue un apoyo emocional constante que reforzó mi perseverancia. A mi perrito Toby por la compañía en las noches que se hicieron largas con el estudio y un sostén de calidez y alivio en los momentos de mayor agotamiento.

AGRADECIMIENTO

Expreso mi más sincero aprecio y agradecimiento a mi asesor el Dr. Víctor, por su respaldo constante, dedicación y dirección continua durante la elaboración y conclusión de esta tesis. Su accesibilidad, sus palabras de aliento, confianza, paciencia, motivación constante y consejos resultaron cruciales para completar exitosamente este proyecto. Mas que un asesor, ha sido para mí un guía, un ejemplo y con todo respeto y gratitud un segundo padre, ya que nunca me dejo sola y siempre creyó en mis capacidades.

Asimismo, quiero dedicarle este logro con todo mi corazón a la Ing. Bárbara, ha sido un pilar fundamental en mi vida. No solo me brindo su apoyo académico en cada etapa de esta tesis, gracias por cada palabra firme pero llena de cariño que me impulso a seguir adelante. Ha sido una amiga incondicional, una guía profesional ejemplar y para mí, una segunda madre. Le agradezco profundamente por su paciencia, su dedicación y por no soltarme cuando más lo necesitaba.

Al Dr. López por su apoyo orientación y conocimientos compartidos, los cuales contribuyeron a fortalecer el enfoque técnico y científico de la presente investigación.

Extiendo un reconocimiento especial a mis padres y hermanos, quienes, mediante su respaldo absoluto, tolerancia y estímulo persistente, se convirtieron en un pilar esencial en el transcurso de mi preparación académica y en cada momento de mi evolución profesional.

Por último, manifiesto mi gratitud hacia todas las personas que directa o indirectamente, ofrecieron su colaboración y contribuyeron al cumplimiento de esta meta académica.

RESUMEN

El estudio tuvo finalidad comparar la efectividad de dos técnicas para la captación de partículas sedimentables atmosféricas (PAS) en las instalaciones de la Universidad Nacional Agraria de la Selva (UNAS), situado en Tingo María, Huánuco, Perú. Estas partículas, compuestas sobre todo por polvo, polen, hollín y materiales mayores a 10 μm , son un indicador de la calidad del aire debido a sus posibles efectos en la salud y el ambiente.

El estudio comparo la eficiencia de captación de partículas atmosféricas sedimentables (PAS) utilizando placas captadoras fabricadas de vidrio y plástico, empleando adherentes como vaselina y silicona en spray, metodología validada por el SENAMHI. El monitoreo se realizó desde noviembre de 2023 hasta enero de 2024 en dos puntos estratégicos dentro del campus universitario. Se observó que las mayores concentraciones de PAS se registraron valores que oscilaron entre 0,15 y 0,60 $\text{mg}/\text{cm}^2/\text{mes}$, superando en algunos casos el límite por la OMS.

Las placas de vidrio fueron más eficientes que las de plástico, especialmente con alta humedad y lluvia. El ANOVA mostró que no hubo diferencias relevantes entre los materiales de las placas, pero sí se evidenciaron variaciones significativas según el tipo de adherente empleado. En la UNAS, las placas tratadas con silicona en spray presentaron el mayor rendimiento en la captación de PAS, seguidas por las impregnadas con vaselina. Ambas superaron a las placas sin adherente. Por tanto, el uso de adherentes especialmente la silicona en spray se confirma como el método más eficaz para el monitoreo pasivo del aire.

ABSTRACT

The purpose of the study was to compare the effectiveness of two techniques for capturing settleable particulate matter (SPM; PAS in Spanish) within the installations of the Universidad Nacional Agraria de la Selva (UNAS), located in Tingo Maria, Huánuco, Peru. These particles, composed of mostly dust, pollen, soot, and matter greater than 10 μm , are an indicator of the air quality, due to their possible effects on health and the environment.

In the study the efficiency of capturing settleable particulate matter (SPM) was compared using settle plates made from glass and plastic, with adhesives such as Vaseline and silicon spray; a methodology validated by SENAMHI (acronym in Spanish). The monitoring was carried out from November 2023 until January 2024 at two strategic points within the university campus. It was observed that the greatest concentrations of SPM were recorded with values that oscillated between 0.15 and 0.60 $\text{mg}/\text{cm}^2/\text{month}$, in some cases, surpassing the WHO (OMS in Spanish) limits.

The glass plates were more efficient than plastic, especially with high humidity and rain. From the ANOVA it was revealed that there were no relevant differences between the plate materials, but a significant variation according to the type of adhesive that was used was evidenced. In the UNAS, the plates treated with silicon spray presented the best yield in capturing the SPM, followed by those covered with Vaseline. Both surpassed the anti-stick plates. Thus, the use of adhesives, especially silicon spray was confirmed to be the most effective method for monitoring passive [particles] from the air.

INDICE

I.	INTRODUCCIÓN	1
1.1.	Objetivo general.....	2
1.2.	Objetivos específicos.....	2
II.	REVISIÓN DE LITERATURA	3
2.1.	Antecedentes.....	3
2.1.1.	Antecedentes internacionales.....	3
2.1.2.	Antecedentes nacionales.....	6
2.1.3.	Antecedentes locales.....	9
2.2.	Conceptos básicos.....	12
2.2.1.	Contaminación de aire.....	12
2.2.2.	Fuentes de contaminación del aire.....	13
2.2.3.	Material particulado sedimentable (MPS) o polvo atmosférico sedimentable (PAS).....	13
2.2.4.	Composición de material particulado.....	14
2.2.5.	Efectos de las partículas.....	14
2.2.6.	Metodología de medición de partículas atmosféricas sedimentables.....	15
2.2.7.	Método de placas receptoras.....	15
2.2.8.	Técnicas de muestreo.....	15
A.	Activos.....	16
B.	Pasivos.....	16
III.	MATERIALES Y MÉTODOS	18
3.1.	Ubicación de estudio.....	18
3.1.1.	Política.....	18
3.1.2.	Geografía.....	19
3.2.	Aspectos ambientales y sociales.....	20
3.2.1.	Clima.....	20
3.2.2.	Viento.....	21
3.2.3.	Población.....	22
3.2.4.	Actividades socio económicas.....	23
3.3.	Aspectos geográficos.....	24

3.4.	Materiales y equipos	24
3.4.1.	Materiales	24
3.4.2.	Equipos	24
3.4.3.	Reactivos	24
3.4.4.	Programa de computación	25
3.5.	Tipo de investigación	25
3.6.	Variables en estudio	25
3.6.1.	Variable independiente	25
3.6.2.	Variable dependiente	25
3.7.	Diseño de investigación	25
3.8.	Análisis estadístico	26
3.9.	Metodología	28
3.9.1.	Concentración de material particulado en la casa de estudio Universidad Nacional Agraria de la Selva	29
3.9.2.	Efecto del tipo de superficie de captación de muestra en la concentración de partículas atmosféricas sedimentables.	33
3.9.3.	Efecto de los adherentes en la concentración de partículas atmosféricas sedimentables 34	
IV.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	35
4.1.	Determinar la concentración de material particulado en la Universidad Nacional Agraria de la Selva.	35
4.2.	Analizar el efecto del tipo de superficie de captación de muestra en la concentración de partículas atmosféricas sedimentables.	38
4.3.	Analizar el efecto de los adherentes en la concentración de partículas atmosféricas sedimentables.	41
4.4.	Determinar la efectividad de dos técnicas de muestreo de partículas atmosféricas sedimentables del aire en las instalaciones de la Universidad Nacional Agraria de la Selva. ...	44
VI.	PROPUESTAS A FUTURO	49
	50
VII.	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	50
VIII.	ANEXOS	53

INDICE DE TABLA

Tabla	Página
Tabla 1. Ventajas comparativas frente a métodos activos	17
Tabla 2. Coordenadas geográficas del lugar de ejecución	19
Tabla 3. Georreferenciación de las estaciones seleccionadas para la evaluación ambiental	19
Tabla 4. Registro de variables meteorológicas de la estación base en Tingo María	20
Tabla 5. Población total proyectada, densidad poblacional en el año 2022-2023.	22
Tabla 6. Atenciones de niños(as) menores de 5 años afectados con infecciones respiratorias.	22
Tabla 7. Principales causas de Morbilidad, según diagnostico 2019-2022.....	22
Tabla 8. Población atendida con Neumonía, según provincia y distrito, 2018-2022.....	23
Tabla 9. Factores generadores de contaminación ambiental identificados por distrito 2022	24
Tabla 10. Análisis de la varianza	26
Tabla 11. Área para cada tipo de superficie de captación.....	29
Tabla 12. ANOVA para PAS según el tipo de superficie de captación (soporte).....	40
Tabla 13. ANOVA para PAS según el tipo de adherentes	42
Tabla 14. Pruebas de Múltiple Rangos para PAS por Adherente.....	42
Tabla 15. Comparación múltiple de dos técnicas de muestreo	44
Tabla 16. Concentración de PAS (mg/cm ² /mes) según técnica de muestreo pasivo	45
Tabla 17. Índice porcentual de similitud entre técnicas de muestreo pasivo de PAS.....	46

INDICE DE FIGURAS

Figura	Página
Figura 1. Ubicación geográfica de la Universidad Nacional Agraria de la Selva	18
Figura 2. Posición de los dos puntos de monitoreo en el recinto universitario	20
Figura 3. En enero 2023, se observaron fluctuaciones en las temperaturas máximas del aire en las regiones de selva alta y selva baja de Huánuco.	21
Figura 4. Esquema del planteamiento de la investigación	26
Figura 5. Procedimiento con placas receptoras	28
Figura 6. Soporte diseñado para las placas receptoras en el punto P1	31
Figura 7. Soporte creado para las placas receptoras en el lugar P2.....	32
Figura 8. Concentración promedio de PAS en dos Puntos de muestreo.	35
Figura 9. Concentraciones de PAS noviembre, diciembre y enero	36
Figura 10. Concentración de PAS según el tipo de superficie de captación.	38
Figura 11. Concentraciones de PAS según tipo de superficie plástico-vidrio.....	39
Figura 12. Concentraciones de PAS noviembre- enero según el tipo de adherente	41
Figura 13. Puntos de Monitoreo P1 Y P2.....	53
Figura 14. Registro del Primer peso de las placas receptoras Noviembre 2023.....	53
Figura 15. Instalacion de placas receptoras en el P2	54
Figura 16. Recojo de Muestra de placas receptoras en el P2	54
Figura 17. Registro de concentración de partículas atmosférica sedimentable	55
Figura 18. Pesado de concentración de partículas atmosférica sedimentable	55
Figura 19. Preparación de placas receptoras Diciembre 2023	56
Figura 20. Concentración de placas receptoras con partículas atmosféricas sedimentable	56
Figura 21. Pesado de placas receptoras Diciembre 2023 P1.....	57
Figura 22. Registro de concentración de partículas atmosférica sedimentable diciembre 2023	57
Figura 23. Pesado de placas PSV 3	58
Figura 24. Pesado de placas receptoras Diciembre 2023 P2.....	58
Figura 25. Instalacion de Placas receptoras P2 Noviembre 2023	59
Figura 26. Instalacion de Placas receptoras P2 Diciembre 2023	59
Figura 27. Instalacion de placas receptoras P1	60
Figura 28. Instalacion de placas receptoras P1	60
Figura 29. Preparación de las placas receptoras PSV, PCV y PCS.....	61
Figura 30. Registro de Pesos Iniciales del mes de Noviembre 2023	61
Figura 31. Instalación del Soporte de placas receptoras	62
Figura 32. Pesado de PCS Enero 2024.....	62
Figura 33. Placa receptora de vidrio con spray.....	63
Figura 34. Registro de Pesos Iniciales del mes de Enero 2024.....	63
Figura 35. Placa receptora de vidrio con vaselina 2	64

Figura 36. Placa de vidrio cubierta con vaselina	64
Figura 37. Placa de plástico recubierta con silicona en spray	65
Figura 38. Preparación de placas receptoras con spray	65
Figura 39. Preparación de tipos de placas y tipos de adherentes	66
Figura 40. Preparación del punto P2	66
Figura 41. Armado del Soporte de placas receptoras.....	67
Figura 42. Construcción de soporte de placas receptoras	67
Figura 43. Medición de coordenadas UTM.....	68
Figura 44. Medición de coordenadas UTM con el GPS	68
Figura 45. Concentración de partículas atmosférica sedimentable noviembre 2023	69
Figura 46. Concentración de partículas atmosférica sedimentable noviembre 2023	69

I. INTRODUCCIÓN

Desde estudios anteriores se vienen desarrollando las técnicas de muestreo, con el fin de examinar el grado de contaminación ambiental originada por las partículas en suspensión que se depositan en el entorno. La medición de la pureza del aire se puede llevar a cabo a través de múltiples parámetros, entre los que sobresale el polvo sedimentable atmosférico. Este comprende partículas con un diámetro superior a $10\mu\text{m}$ que flotan en la atmósfera y, a causa de su masa, acaban asentándose en diversas superficies. Su constitución abarca, entre otros elementos, polvo, polen, hollín y residuos de humo.

En Perú, las concentraciones medias de partículas sedimentables atmosféricas ocupan un lugar destacado entre las más altas, no solo en el ámbito regional sino también en el contexto latinoamericano. La degradación de la calidad del aire en las metrópolis principales representa un desafío global que se agrava a medida que aumenta la densidad poblacional.

En Tingo María, el clima ha sido influenciado por el crecimiento de actividades humanas, entre otros factores. Actualmente, la presencia de material particulado en el aire representa una seria preocupación para la salud pública, ya que al inhalarse puede infiltrarse profundamente en los pulmones, originando o empeorando trastornos cardiovasculares y respiratorios. Por lo que la Organización Mundial de la Salud ha definido un límite máximo aceptable de $0,5 \text{ mg/cm}^2/\text{mes}$ para este tipo de contaminante, considerando sus efectos perjudiciales sobre la salud y el bienestar de los organismos vivos.

Sin embargo, varios estudios han demostrado que la inhalación de sustancias contaminantes en el medio ambiente, incluso si están por debajo de los umbrales fijados por las regulaciones, pueden estar vinculada a principios de asma y enfermedades respiratorias.

Cabe mencionar que la investigación realizada va a permitir contar con una base de datos en Tingo María, para que el resultado obtenido pueda ser sujeto a una semejanza de futuras investigaciones. Dado esto, este estudio busca determinar la técnica más efectiva para recolectar partículas sedimentables atmosféricas (PAS), aplicando la metodología validada por

el SENAMHI y utilizando placas colectoras elaboradas en vidrio y material plástico; así mismo con adherentes como vaselina y silicona en spray.

Por lo expuesto, resulta fundamental investigar sobre las partículas atmosféricas sedimentables (PAS) y determinar el procedimiento que ofrezca mayor eficiencia, practicidad y bajo costo para la adecuada ubicación de los puntos de monitoreo. Con este fin, esta tesis se desarrolló basándose en la siguiente interrogante de investigación. ¿Cuál es la efectividad de dos técnicas de muestreo pasivo de partículas atmosféricas sedimentables del aire durante el periodo noviembre 2023 – enero 2024 en las instalaciones de la Universidad Nacional Agraria de la Selva? Teniendo en cuenta esta pregunta, se plantea la hipótesis siguiente: La efectividad de dos técnicas de muestreo pasivo de partículas atmosféricas sedimentables en la Universidad Nacional Agraria de la Selva (UNAS) tendrá una similitud porcentual de 70% para el periodo noviembre 2023- enero 2024.

1.1. Objetivo general

- Determinar la efectividad de dos técnicas de muestreo pasivo de partícula atmosféricas sedimentables del aire en las instalaciones de la Universidad Nacional Agraria de la Selva durante el periodo noviembre 2023- enero 2024.

1.2. Objetivos específicos

- Determinar la concentración de material particulado en la Universidad Nacional Agraria de la Selva.
- Analizar el efecto del tipo de superficie de captación de muestra en la concentración de partículas atmosféricas sedimentables.
- Analizar el efecto de los adherentes en la concentración de partículas atmosféricas sedimentables.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Antecedentes

2.1.1. Antecedentes internacionales

Lara (2025) y otros autores desarrollaron una investigación llamada “Diseño metodológico para la formulación de una propuesta orientada a determinar el material plástico más adecuado para la fabricación de cajas de Petri en una empresa del sector plástico en Guatemala”. En dicho estudio, la empresa determinó que las placas Petri son muy solicitadas por que son un producto plástico indispensable en los laboratorios médicos. Se trata de recipientes pequeños, transparentes y plásticos, donde a menudo se depositan muestras orgánicas e inorgánicas de todas las clases, con el beneficio adicional de ser fáciles de guardar por su tamaño relativamente pequeño. Esta investigación tuvo como finalidad el desarrollo de una propuesta especializada destinada a definir el material plástico óptimo para la producción de cajas petri, analizando sus características físicas, técnicas y químicas. El plástico poliestireno el más utilizado no solo porque es ligero, también por su estabilidad química, siendo utilizado para cajas Petri, tubos de ensayo y envases de farmacéuticos más específicos. Los resultados evidenciaron que el poliestireno vinílico es un material adecuado para este tipo de aplicaciones, debido a su densidad controlada, baja porosidad y superficie homogénea, características que favorecen la higiene, la esterilización y la confiabilidad en la captación y análisis de material particulado y microbiológico, cumpliendo con los estándares requeridos para su uso en entornos clínicos y de laboratorio.

Popoola, et al (2023), realizó un estudio en el relleno sanitario sitio de disposición a cielo abierto Sokoto- Aiyekale ubicado en Nigeria, con la finalidad de evaluar los efectos de la quema abierta de residuos sólidos urbanos en emisiones de partículas (PM) y compuestos orgánicos volátiles (VOCs) hacia las comunidades cercanas. Para capturar material particulado sedimentado se instalaron medidores de deposición en lugares seleccionados alrededor del sitio de quema, durante temporadas secas y húmedas, conocidos como medidores de deposición (frascos de sedimentación) estos equipos recolectan material que: cae por gravedad (deposición seca), es arrastrado por lluvia deposición húmeda, el material recolectado fue posteriormente filtrado, secado y analizado. Se utilizó el modelo de dispersión atmosférica AERMOD, que incorpora datos meteorológicos, topografía y emisión estimada para simular la

distribución espacial de contaminantes hasta un radio de 15 Km alrededor del sitio de quema. Los autores destacan que el incremento de partículas sedimentables se debe a varios elementos y factores, como el residuo orgánico o inorgánico, la temperatura, la velocidad del gas, el contenido. Los resultados mostraron que los datos de emisiones de material particulado (PM) generado por la quema abierta oscilo entre 2200,5 a 2481,1 Toneladas/ año, y para VOCs entre 5913,9 a 6668,0 toneladas/año entre 2016 y 2020. Las concentraciones de PM y VOC modeladas a nivel del suelo muestran valores elevados, lo que implica una amenaza seria para el bienestar de la población y la conservación ambiental.

Yuan, et al (2023), en la investigación experimental se evaluó la relación entre variables atmosféricas controladas y el comportamiento de sedimentación de partículas en suspensión. La investigación se realizó en un sistema de ensayo con control independiente de temperatura y humedad relativa, lo que permitió simular diferentes escenarios ambientales. El experimento fue desarrollado en una cámara ambiental de laboratorio perteneciente a una institución universitaria en China, donde se controlaron de manera independiente la temperatura y la humedad relativa para evaluar su influencia en la deposición de partículas. Se evaluaron partículas generadas a partir de biomasa, considerando distintos rangos de tamaño, bajo condiciones térmicas comprendidas entre 20 °C y 40 °C y niveles de humedad relativa entre 25% y 65%. Se observó que descensos en la temperatura favorecen la sedimentación de partículas de mayor diámetro, mientras que incrementos en la humedad relativa potencian la caída de partículas superiores a 0,5 micrómetros. Este comportamiento se asocia a fenómenos de absorción de vapor de agua, que las incrementan la masa y densidad efectiva de las partículas, acelerando su desplazamiento gravitacional. Los resultados demostraron que las condiciones climáticas modifican directamente la dinámica de deposición debido a cambio en las propiedades físicas de las partículas y del aire circundante. La temperatura influye en la densidad y viscosidad del aire: cuando la temperatura disminuye, el aire se vuelve más denso, lo que puede favorecer la pérdida de energía cinética de partículas de mayor tamaño y facilitar su sedimentación por efecto gravitacional.

Bastos, et al (2022), en su estudio titulado Medición y monitoreo de material particulado en obras de construcción: directrices para el enfoque gravimétrico, la investigación surge ante la ausencia de métodos experimentales estandarizados para el monitoreo de MP en obras de construcción, lo que limita la comparabilidad de resultados y el avance de estudios científicos en este campo. La investigación se fundamentó en una revisión

profunda de tesis, artículos científicos, así como en el análisis de normativas y lineamientos técnicos de organismos gubernamentales internacionales, como la Organización Mundial de la Salud (OMS), con la finalidad de proponer directrices metodológicas, los autores establecen criterios para la selección de equipos y filtros, recomendando el uso de filtros de teflón y policarbonato debido a que no contienen sílice, uno de los componentes más abundantes en los insumos de la construcción, lo que favorece la caracterización elemental de las muestras; no obstante, advierten que su contenido de carbono puede representar una limitación en ciertos análisis específicos.

Asimismo, el estudio resalta la relevancia de la correcta gestión de los filtros, indicando que estos deben almacenarse en placas Petri debidamente identificadas y acondicionarse bajo condiciones controladas de temperatura (20-23 °C) y humedad relativa (30-40%) durante al menos 24 horas previas al pesaje, conforme a las recomendaciones de la EPA y el código de Regulaciones Federales (CFR). Además, señalan que al emplear superficies sustitutivas para la captación de partículas sedimentables, es necesario considerar los diversos factores ambientales entre ellos la lluvia y los vientos fuertes, los cuales pueden provocar pérdida de material recolectado, así como definir adecuadamente el tiempo de exposición del colector para evitar la saturación de polvo. Finalmente, los autores recomiendan para futuras investigaciones la aplicación de un enfoque de monitoreo combinado, integrando el muestreo gravimétrico con sistemas de monitoreo en tiempo real mediante contadores ópticos de partículas (OPC) y otros sensores de bajo costo, los cuales deben ser previamente validados para su uso en obras de construcción. Este estudio constituye un referente metodológico relevante para la presente investigación, al proporcionar lineamientos técnicos que fortalecen la confiabilidad y comparabilidad de los resultados en la evaluación del material particulado atmosférico.

Cho, S et al (2021), desarrollaron en Corea una investigación titulada “Estudio de las características de la resuspensión de material particulado en el aula escolar mediante experimentos con una cámara de simulación: influencia de la Humedad”, tuvo como propósito principal investigar las propiedades de la resuspensión de PM de acuerdo con la humedad relativa a través de experimentos en cámaras de prueba en el aula. Debido a que en aulas resulta difícil aislar y manejar los elementos que influyen en la resuspensión de material particulado, los autores optaron por un entorno experimental que replica elementos clave como la estructura del aula y los materiales. Los niveles de humedad relativa evaluados fueron 35%, 55%, 75% y 85% colocándola dentro de una cámara ambiental del tamaño real, lo que permitió el control artificial de las condiciones climáticas, seleccionado a partir de datos meteorológicos

de Corea del Sur. La influencia de la humedad sobre la resuspension de PM se evaluó cuantitativamente mediante el cálculo del factor de resuspension. Para la medición de las concentraciones partículas atmosféricas sedimentables en el aire se emplearon espectrómetros de aerosol basados en el principio de dispersión de la Luz. Los resultados analizados reflejaron que la presencia de (PAS) resuspendido como el factor de resuspension disminuyen de manera lineal al aumentar la humedad relativa. Desde un enfoque físico, los autores explican que, en condiciones de alta humedad, la influencia de las fuerzas de van der Waals entre las partículas se reduce, mientras que las fuerzas capilares se incrementan. Este fenómeno favorece una mayor adhesión de las partículas a las superficies, lo que dificulta su desprendimiento durante la actividad humana y, en consecuencia, limita la resuspensión del material particulado en el ambiente interior.

Patricia Krecl (2021) desarrollo su estudio en Londrina, una localidad situada en la parte norte del estado de Panamá, al sur de Brasil. El clima de la región es templado, caracterizado por humedad constante durante todo el año y fuertes veranos. La temperatura promedio anual es 21,6° C y la cantidad de lluvia acumulada en un año es de 1583 mm (INMET, 2019). En su investigación menciona sobre mediciones de PM 2.5 y fijas y móviles, realizadas en un barrio residencial de las afueras de una ciudad brasileña, la gran heterogeneidad espacial de las concentraciones de partículas se asoció con la ocurrencia de eventos de quema de Residuos Sólidos Urbanos. La quema de residuos al aire libre provoca cambios rápidos y bruscos en las concentraciones de partículas en los barrios periféricos. Las concentraciones de PM2.5 alcanzan valores superiores a los de las carreteras con mucho tráfico. El estudio también destaca que el carbono negro forma parte del PM 2.5, generado por la combustión no total de materiales carbonáceos, se asocia con varios efectos nocivos para la salud humana. Si bien Brasil es el tercer mayor emisor de contaminantes atmosféricos por la incineración al aire libre de residuos sólidos urbanos, solo detrás de China e India (Wiedinmyer et al., 2014). La mortalidad prematura de adultos por año debido a la inhalación sostenida de partículas microscópicas con diámetro igual o inferior a 2,5 micrómetro, resultantes de la combustión de residuos a aire libre se estimó en 270,000 en todo el mundo.

2.1.2. Antecedentes nacionales

Davila (2022), abordó la problemática de las partículas atmosféricas sedimentables (PAS) en un sector urbano del distrito de Comas, en Lima; con el propósito de conocer su comportamiento y proponer una solución práctica para su reducción. La propuesta

investigativa se estructuró desde un enfoque cuantitativo, utilizando un diseño no experimental y seguimiento longitudinal, lo que permitió evaluar las variaciones de los niveles de PAS periodo de tres meses febrero a abril.

Para realizar el monitoreo, se empleó un método pasivo basado en placas Petri preparadas con adherente la vaselina para facilitar la captación de las partículas sedimentables. Este procedimiento consiste en colocar las placas al ambiente, registrar el peso inicial, dejar transcurrir el periodo de exposición y luego pesar nuevamente las placas así para determinar la masa de material particulado colectado. El procedimiento consiste en restar el peso inicial al final y dividir el resultado por el área de captación esto permitió calcular la concentración de PAS en $\text{mg}/\text{cm}^2/\text{mes}$.

Los resultados mostraron que los niveles de PAS presentaron variaciones en los 30 puntos de muestreo, con ciertos puntos superando umbrales consideraciones preocupantes para la calidad del aire ambiental. Para abordar esta situación, los investigadores diseñaron y evaluaron un modelo casero de purificador de aire, con el fin de reducir la cantidad de material particulado presente en el ambiente mediante la filtración mecánica, y se construyó siguiendo pautas técnicas revisadas de literaturas. Cuando el prototipo se utilizó en condiciones controladas se observó que el purificador fue capaz de eliminar una fracción importante de partículas del aire, demostrando su eficacia para reducir las concentraciones de material particulado a un costo de producción menor que las alternativas comerciales. Asimismo, los factores que influyen son el lugar de las muestras, el flujo vehicular, factor climático como la precipitación y la dirección del viento. Este hallazgo nos lleva a concluir que el diseño propuesto no solo es técnicamente factible sino también asequible.

Carranza et al (2021), en su proyecto orientado a la fiscalización ambiental titulado “La incorporación del material particulado sedimentable como parámetro en el ECA aire para la evaluación ambiental”, realizaron una revisión y análisis de las principales metodologías empleadas para la medición del material particulado sedimentable (MPS). Los autores señalan que una de las principales ventajas de estos métodos es su bajo costo operativo, lo que facilita su uso en programas de monitoreo ambiental. En general, los métodos utilizados se basan en principios gravimétricos y pasivos donde el material depositado se recolecta durante un periodo de aproximadamente un mes y la concentración se define como el cociente entre la masa acumulada y el área impactada en unidades de $\text{mg}/\text{cm}^2/\text{mes}$.

El método más ampliamente adoptado a escala global se basa en la norma ASTM D1739-98, que utiliza recolectores pasivos generalmente tubos de PVC con un diámetro

aproximado de 15 cm y una altura de 40 cm, estos son colocados en estructuras metálicas a una elevación cercana a 1,5 metros sobre el suelo. Sin embargo, los investigadores señalan que estos dispositivos tienen restricciones al evaluar la deposición de polvo en zonas confinadas o afectadas por emisores localizados, puesto que su configuración no permite una diferenciación permitiendo un seguimiento detallado de la velocidad de sedimentación de partículas en lugares concretos.

Como opción se propone el empleo de superficies receptoras como placas Petri o soportes análogos las cuales se limpian previamente y se recubren con un adhesivo (habitualmente vaselina) para promover la adherencia de las partículas que se depositan sobre esta. En este sentido, se mencionan investigaciones comparativas tales como la de Marcos (2009) donde contrastaron el rendimiento de los tubos pasivos con las placas receptoras, considerando el impacto del viento en la eficacia de captura. Los hallazgos indicaron que las placas receptoras pueden exhibir una capacidad de retención inferior ya que tras la formación de una primera capa de partículas el material subsiguiente se desprende más fácilmente debido al viento, provocando pérdidas en la muestra. Por ende, los autores apuntan a una posibilidad significativa de infravalorar las concentraciones reales de MPS, si bien determinar con exactitud el grado de esa subestimación resulta desafiante.

En un estudio realizado por Cortez E (2020), se evaluaron las partículas sólidas totales (PST) utilizando la técnica gravimétrica en la atmósfera de la carretera del tramo Celendín – José Galvez, abarcando los meses de septiembre a noviembre de 2018. Se utilizaron placas receptoras con una superficie de 10 cm², tratadas previamente con vaselina como agente adhesivo, colocadas en nueve ubicaciones clave distribuidas estratégicamente por el trayecto. Los hallazgos indicaron que, el promedio más elevado supera el límite establecido por la (OMS), se detectó una notable variación geográfica en los niveles de PST, principalmente explicada por factores ambientales como el desgaste del terreno, las peculiaridades de cada zona, el volumen de tráfico rodado, la fuerza del viento, las estaciones lluviosas y secas, y la humedad ambiental. El análisis también destaca el papel del polvo levantado desde el pavimento y áreas cercanas, lo que incrementa la cantidad de partículas en suspensión. Respecto al tipo de carrera, se observó que los segmentos de tierra compactada mostraron concentraciones más bajas de PST comparadas con las pavimentadas donde se notó un leve incremento ligado a procesos que promueven la liberación y el levantamiento de partículas. De acuerdo con trabajos anteriores, se confirma una correlación negativa entre los niveles de PST y la humedad relativa (Pérez, 2010), significando que un mayor grado de humedad implica

menos partículas en el aire. Igualmente, se subraya el impacto de las precipitaciones puesto que en los meses con más lluvia tales como octubre y noviembre se produjo una reducción en las concentraciones de PST, alineándose con las observaciones de Castillo (2017) sobre como la lluvia disminuye las partículas atmosféricas.

2.1.3. Antecedentes locales

Sánchez (2024), realizó su investigación ambiental en seis localidades de la provincia de Leoncio Prado, ubicada en Huánuco: Castillo Grande, Mariano Damaso Beraun, Luyando, Daniel Alomias Robles, Pueblo Nuevo y Santo Domingo de Anda. El objetivo principal de la investigación fue medir la acumulación de partículas atmosféricas sedimentables en oficinas administrativas municipales. Para recopilar información, se eligieron tres zonas operativas e cada ayuntamiento – Registro Civil, Recursos Humanos y Mesa de Partes – empleando la técnica gravimétrica para el análisis cuantitativo.

La metodología incluyó la utilización de 90 filtros de fibra de vidrio Whatman GF/C estos sirvieron como medio para capturar el material particulado, se emplearon vidrios de reloj como áreas de exposición, y el tratamiento de las muestras se llevó a cabo mediante filtración al vacío utilizando embudos Buchner. Cada dispositivo de recolección estuvo activo por 30 días, con cambios mensuales durante cinco meses consecutivos. La medición se presentó en unidades de $\text{mg}/\text{cm}^2/\text{mes}$, obtenida al comparar el peso de los filtros antes y después del periodo de exposición. Los hallazgos mostraron que las localidades de Castillo Grande ($0,4937 \text{ mg}/\text{cm}^2/\text{mes}$) y pueblo nuevo ($0,4705 \text{ mg}/\text{cm}^2/\text{mes}$) alcanzaron niveles próximos al límite de referencia de $0,5 \text{ mg}/\text{cm}^2/\text{mes}$ establecido por la Organización Mundial de la Salud, con excedentes ocasionales, especialmente en la sección de Registro Civil. Además, se observó que la porción insoluble represento la mayoría del material recopilado, sugiriendo una predominancia de partículas de origen mineral. El examen estadístico, realizado a través de ANOVA, indico diferencias notables entre localidades y entre las áreas internas analizadas ($p < 0,05$). En cuanto a la interpretación, se determinó que las concentraciones más altas de deposición se relacionaron fundamentalmente con elementos externos como el tipo de carretera, el tráfico vehicular y los procesos de levantamiento de polvo, en lugar de la movilidad interna de personas. Esta investigación sirve como base importante para futuros trabajos locales enfocados en la cuantificación de partículas sedimentables usando métodos gravimétricos.

Livia et al. (2023) llevaron a cabo un estudio destinado a examinar la acumulación de partículas atmosféricas sedimentables en residencias situadas en el área urbana de la provincia de Leoncio Prado, en el departamento de Huánuco. La investigación adoptó un

enfoque descriptivo transversal, incorporando 12 estaciones de observación ubicadas de forma estratégica en diversos barrios de la localidad. Para recolectar el material particulado, se utilizaron placas captadoras instaladas en soportes de unos 30cm de altura, equipadas con una base inferior cubierta por una malla metálica de 25 mm, con el propósito de impedir la entrada de insectos o agentes externos. El proceso comenzó con la medición del peso inicial de la placa Petri junto al papel filtro limpio; luego el material obtenido se filtró y se secó en un horno a 105° C hasta lograr un peso estable. La porción insoluble del sedimento se calculó comparando la masa del filtro vacío con la del filtro que contenía el residuo seco.

Los hallazgos revelaron diferencias notables en las concentraciones según la ubicación. Se registraron niveles de 0,372 mg/cm²/ mes en la Avenida Amazonas; 0,384 mg/cm²/ mes en el Jiron Julio Burga; 0,430 mg/cm²/ mes en la Avenida Raymondi; 0,478 mg/cm²/ mes en Naranjillo Centro; 0,633 mg/cm²/ mes en Electrocentro; 0,705 mg/cm²/ mes en Naranjillo Entrada; 0,722 mg/cm²/ mes en Afilador; 0,955 mg/cm²/ mes en otro sector de la Avenida Raymondi; 0,966 mg/cm²/ mes en Brisas del Huallaga; 0,989 mg/cm²/ mes en Castillo Grande Entrada; 1,018 mg/cm²/ mes en Supte San Jorge; y 1,148 mg/cm²/ mes en Castillo Grande Centro. En conjunto, ocho de las doce estaciones excedieron el límite de referencia de 0,5 mg/cm²/ mes recomendado por la Organización Mundial de la Salud. Los investigadores atribuyen las concentraciones más altas fundamentalmente al elevado movimiento de vehículos en ciertas zonas urbanas, alineándose con las observaciones de Miranda et al (2019) y Pacsi (2016), quienes enfatizan el impacto del tráfico vehicular en el aumento de la deposición de polvo atmosférico. Además, elementos como la condición y la edad de la flota automotriz, el tipo de combustible utilizado y las condiciones climáticas regionales se identificaron como contribuyentes al incremento de la carga de partículas sedimentables en el entorno.

Macedo et al (2023), en la investigación orientado a cuantificar el polvo atmosférico sedimentable en tres arterias principales de la ciudad de Iquitos durante el año 2022: José Abelardo Quiñones, Participación y la Marina. La investigación incluyó la colocación de 12 estaciones de medición repartidas de forma equilibrada en estas calles, con el fin de detectar diferencias en la acumulación de partículas en distintos puntos. Para obtener las muestras, se empleó el método pasivo de pasivo de placas colectoras, una técnica común en análisis de sedimentación por gravedad. Este enfoque implica colocar una lámina de vidrio cubierta con un adhesivo, como vaselina, expuesta por un tiempo variable, que va desde unas horas hasta meses. Las partículas en el aire caen por efecto de la gravedad y se adhieren a la superficie, la medición se efectúa a través del peso, comparando el inicial con el final tras el

periodo de exposición. En el Perú, esta técnica es utilizada por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) para examinar el polvo sedimentable.

Los hallazgos mostraron que la estación AV- 2-3, en la avenida Participación, alcanzo niveles de 0,567; 0,574 y 0,554 mg/cm²/ mes en octubre, noviembre y diciembre, en ese orden. Asimismo, la estación AV-3-3, localizada en la avenida La Marina, registró valores de 0,647; 0,648 y 0,646 mg/cm²/ mes durante los mismos meses, En ambas situaciones, las cifras excedieron el límite de referencia de 0,5 mg/cm²/ mes establecido por la Organización Mundial de la Salud, debido a la alta carga vehicular lo que se sugiere que factores como el tráfico intenso, la calidad del combustible, y exposición prolongada contribuye al aumento de concentración.

Zevallos (2023), en su investigación examino la acumulación de partículas sedimentables en el aire de Tingo María y sus alrededores, como parte de un proyecto vinculado a la Universidad Nacional Agraria de la Selva. La vigilancia se realizó entre noviembre de 2016 y enero de 2017, cubriendo cinco localidades clave: Tingo María, Afilador, Castillo Grande, Supte San Jorge y Naranjillo. En cada sitio, se colocaron tres dispositivos de recolección, con un periodo de exposición de 30 días. El análisis de las muestras siguió el enfoque gravimétrico, se midió el peso de filtro de fibra de vidrio en estado limpio; a continuación, se filtró el material capturado en los contenedores y se secaron los filtros en una estufa a 105 °C hasta lograr una masa estable. La concentración se determinó evaluando la diferencia en el peso antes y después del proceso. Los hallazgos revelaron que, en la zona urbana de Tingo María, la media de material depositado alcanzó aproximadamente 0,4743 mg/cm²/ mes. Sin embargo, durante diciembre de 2016, se observaron mediciones que superaron el umbral máximo de 0,5 mg/cm²/ mes recomendado por la Organización Mundial de la Salud (OMS), con valores de 0,5093 mg/cm²/mes en Tingo María y 0,5135 mg/cm²/ mes en Castillo Grande, evidenciando un nivel de contaminación atmosférica significativo. Además, se determinaron los porcentajes de fracción soluble e insoluble, así como el análisis fisicoquímico de las muestras recolectadas.

En un estudio realizado por Livia en 2020, titulado “Contaminación del aire por partículas atmosféricas sedimentables en el ambiente interior de la zona urbana de Tingo María”, se realizo un seguimiento desde abril hasta septiembre en 12 puntos de recolección. Para ello utilizo un método pasivo con placas receptoras, optando por no emplear vaselina como adhesivo, a diferencia de lo recomendado por el SENAMHI (2014), para evitar alteraciones en el análisis químico posterior de las partículas atmosféricas sedimentables (PAS).

Las muestras se expusieron durante un periodo de 30 días y transcurrido ese tiempo las partículas acumuladas se recolectaron usando agua desionizada, lo que permitió obtener una disolución con las partículas capturadas. La medición de la concentración se efectuó mediante un enfoque gravimétrico, con resultados expresados en mg/cm^2 por mes. Además, se analizó la composición física, separando las fracciones solubles e insolubles; la parte soluble se examinó para medir su pH composición química. De los 72 datos recopilados, 53 superaron el umbral de referencia de la OMS, fijado en $0,5 \text{ mg}/\text{cm}^2$ por mes. Respecto a la composición, el 83% fue soluble y el 17% insoluble. En la fracción soluble se detectaron iones como Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , Cl^- y SO_4^{2-} . El área con el mayor grado de contaminación por partículas sedimentables resultó ser Castillo Fondo, con un valor de $1,148 \text{ mg}/\text{cm}^2$ mensuales. Se observó que la variación más significativa corresponde al punto de Naranjillo Plaza, donde se registró la mayor concentración en junio con un valor de $0,557 \text{ mg}/\text{cm}^2/\text{mes}$ y la menor concentración fue en abril, con $0,094 \text{ mg}/\text{cm}^2/\text{mes}$. Asimismo, el punto de Brisas también evidenció fluctuaciones notables, alcanzando su valor máximo en julio alcanzando $0,572 \text{ mg}/\text{cm}^2/\text{mes}$ mientras que en agosto se presentó el nivel más bajo con $0,225 \text{ mg}/\text{cm}^2/\text{mes}$. Estas variaciones ponen de manifiesto el efecto de elementos ambientales específicos, como las condiciones climáticas y las acciones realizadas por las personas, sobre los niveles de partículas sedimentables en la zona investigada.

2.2. Conceptos básicos

2.2.1. Contaminación de aire

La contaminación del aire representa uno de los desafíos ambientales más significativos de la actualidad y un área clave en los estudios científicos. Según la Organización Mundial de la Salud, se describe como la existencia de sustancias químicas, físicas o biológicas en el aire que modifican la estructura original de la atmósfera y generan impactos adversos en la salud de las personas (WHO, 2024). De manera similar, el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente considera que la contaminación del aire es el principal peligro ambiental para la salud en todo el mundo, a causa de su vínculo directo con las muertes tempranas y el deterioro de los ecosistemas (UNEP, 2025). Desde una perspectiva económica, el Banco Mundial destaca que los impactos de la contaminación del aire incluyen costos significativos en los sistemas de salud y pérdidas en la productividad, lo que refuerza la necesidad de investigaciones orientadas a su prevención y control (World Bank, 2022).

2.2.2. Fuentes de contaminación del aire

Pueden clasificarse en antropogénicas y naturales. Entre las principales fuentes antropogénicas destacan el transporte vehicular, las actividades industriales, la generación de energía y la quema de combustibles domésticos, que representan la principal fuente de liberación de sustancias perjudiciales en zonas urbanas (WHO, 2024; UNEP,2025). Asimismo, tanto las labores agrícolas como la incineración de biomasa contribuyen significativamente al deterioro del estado de la atmosfera en términos de contaminantes, afectando tanto la salud humana como los ecosistemas (World Bank, 2022).

Diversos autores coinciden en que las fuentes principales de contaminación atmosférica están asociadas a acciones humanas, tales como el transporte, la producción industrial, la combustión de biomasa y la agricultura a gran escala. Estudios recientes evidencian que las emisiones procedentes de vehículos y las operaciones fabriles representan una proporción considerable del material particulado fino que se encuentra en entornos urbanos (Karagulian et al., 2020; Zhang et al., 2021)

2.2.3. Material particulado sedimentable (MPS) o polvo atmosférico sedimentable (PAS)

El material particulado sedimentable, denominado también polvo atmosférico que se asienta, representa la fracción gruesa del material particulado atmosférico, compuesta por elementos con un diámetro típicamente superior a 10 μm que caen al suelo debido a la fuerza gravitacional. Este tipo de partículas proviene principalmente de actividades industriales, mineras, tránsito vehicular (resuspensión de polvo), obras de construcción, así como en fuentes naturales tales como la erosión terrestre (Seinfeld & Pandis, 2016; Querol et al., 2019).

Aunque su habilidad para infiltrarse en el aparato respiratorio es menor en comparación con el $\text{PM}_{2.5}$, el material particulado sedimentable genera impactos ambientales relevantes, como la degradación de superficies, afectación de suelos y cuerpos de agua, y molestias a la población. Además, su composición puede incluir metales pesados y otros contaminantes, por lo que su monitoreo es considerado un indicador importante de presión ambiental local y de la calidad del aire percibida (Vallero, 2019; U.S. EPA, 2020).

2.2.4. Composición de material particulado

Las partículas en suspensión (MP) son consideradas entre los principales contaminantes del aire, dada su compleja estructura química y sus consecuencias perjudiciales para la salud y el entorno natural. Estudios recientes indican que el MP, especialmente el PM_{2.5}, está constituido por una mezcla heterogénea de componentes inorgánicos, orgánicos, carbono elemental y trazas metálicas, cuya proporción varía según las fuentes de emisión, condiciones meteorológicas y procesos atmosféricos secundarios.

La fracción inorgánica soluble del material particulado está dominada por sulfatos (SO₄²⁻), nitratos (NO₃⁻) y amonio (NH₄⁺), estas se generan principalmente mediante procesos fotoquímicos que involucran compuestos gaseosos iniciales como SO₂, NO_x y NH₃. Diversos autores coinciden en que estos compuestos representan una parte significativa de la masa del PM_{2.5} en zonas urbanas e industriales, evidenciando la importancia de la formación secundaria en la atmósfera (Shen et al., 2019; Hao et al., 2024).

Otra fracción relevante es el carbono orgánico (OC) y el carbono elemental o negro (EC/BC), que se vinculan sobre todo con combustiones incompletas, tales como el tránsito vehicular, la incineración de biomasa y el empleo de combustibles fósiles. Investigaciones recientes destacan que el carbono negro no solo contribuye a la toxicidad del PM_{2.5}, sino también al calentamiento climático debido a su capacidad de absorción de radiación solar (Afzal et al., 2025).

Asimismo, el material particulado contiene elementos metálicos y metales pesados tales como hierro (Fe), zinc (Zn), plomo (Pb), níquel (Ni), cromo (Cr) y arsénico (As), los cuales provienen principalmente de actividades industriales, desgaste vehicular y re-suspensión de polvo urbano. Estudios realizados en Europa y Asia han demostrado que, aunque estos elementos representan una fracción menor en masa, poseen una alta relevancia toxicológica (Siudek et al., 2024).

2.2.5. Efectos de las partículas

Las partículas en suspensión (PM), en particular el PM_{2.5}, representan uno de los contaminantes aéreos más perjudiciales por su reducido diámetro y su composición química intrincada. Estudios recientes han demostrado que la exposición aguda y crónica a estas partículas está asociada con un incremento notable en afecciones respiratorias y cardíacas, incluyendo asma, enfermedad pulmonar obstructiva crónica, infartos y accidentes cerebrovasculares (Kelly & Fussell, 2020).

Las partículas finas logran infiltrarse profundamente en los pulmones y acceder al flujo sanguíneo, generando estrés oxidativo e inflamación sistémica, mecanismos fundamentales en la aparición de tumores pulmonares y en el incremento de la mortalidad prematura. La organización mundial de la Salud reconoce al PM_{2.5} como uno de los principales agentes de amenaza ambiental a escala global, responsable de millones de muertes cada año (WHO, 2021).

2.2.6. Metodología de medición de partículas atmosféricas sedimentables

La determinación de partículas sedimentables se efectúa a través de métodos de muestreo pasivo, cuyo objetivo es cuantificar la fracción de partículas que se depositan por efecto de la gravedad en un período determinado. Este método es ampliamente utilizado para evaluar la contaminación por polvo sedimentable en áreas urbanas, industriales y mineras, debido a su simplicidad y bajo costo (ASTM D1739, 2017).

El procedimiento consiste en la instalación de colectores de sedimentación de boca ancha y área conocida, ubicados generalmente entre 2 a 3 metros sobre el suelo, con el fin de minimizar la influencia del polvo superficial. Los colectores permanecen expuestos al ambiente durante períodos prolongados, comúnmente de 30 días, permitiendo la deposición natural de las partículas (Harrison, 2019). Una vez finalizado el período de exposición, el material recolectado es trasladado al laboratorio, donde se somete a un proceso gravimétrico que incluye filtración, secado a temperatura controlada y pesaje con balanza analítica. La cantidad de partículas que se asientan se expresa en mg/m²/día, calculada a partir de la masa acumulada, el área del colector y la duración del periodo de exposición (WHO, 2001).

2.2.7. Método de placas receptoras

Este procedimiento implica la instalación de placas o contenedores recolectores de superficie conocida, generalmente de vidrio o material plástico inerte, ubicados a una elevación de alrededor de 2 a 3 metros por encima del suelo para evitar la interferencia del polvo superficial. Las placas permanecen expuestas al ambiente durante un período definido, comúnmente de 30 días, permitiendo la deposición natural de las partículas presentes en el aire (Harrison, 2019).

2.2.8. Técnicas de muestreo

Las técnicas de muestreo permiten recolectar y cuantificar contaminantes en suspensión dentro de la atmosfera, con el fin de evaluar la condición de la calidad aérea y

los impactos potencialmente negativos en el bienestar de la población y en los ecosistemas. Estas técnicas se separan principalmente en muestreo pasivo y muestreo activo, según el mecanismo de captación del contaminante.

A. Activos

El muestreo activo utiliza equipos mecánicos que succionan una cantidad determinada de aire a través de filtros o materiales absorbentes. Este método permite medir fracciones específicas del material particulado, como PM_{10} y $PM_{2.5}$, y obtener resultados con mayor precisión temporal. El muestreo activo es ampliamente utilizado en redes de monitoreo ambiental y estudios epidemiológicos, aunque requiere mayor inversión económica y mantenimiento técnico (WHO, 2021).

Entre los principales equipos de muestreo activo se encuentran los muestreadores de alto caudal, los muestreadores de bajo caudal y los impactadores en cascada, estos últimos permiten además la separación de partículas por tamaño aerodinámico, lo cual es fundamental para estudios de toxicidad y origen de fuentes (Kelly & Fussell, 2020).

Asimismo, Siudek et al. (2024) destacan que los muestreadores activos, combinados con técnicas analíticas avanzadas, facilitan la atribución de fuentes de emisión, como tráfico vehicular, procesos industriales y resuspensión de polvo. Los autores señalan que esta técnica es particularmente útil en entornos urbanos e industriales donde las concentraciones y composiciones del material particulado varían significativamente en el tiempo.

B. Pasivos

El muestreo pasivo se basa en procesos naturales como la difusión o sedimentación gravitacional, sin el uso de sistemas de bombeo. Entre sus aplicaciones más comunes se encuentra la medición de partículas atmosféricas sedimentables mediante placas receptoras o colectores abiertos. Esta técnica se caracteriza por su bajo costo y simplicidad, siendo adecuada para estudios de deposición de polvo y monitoreo a largo plazo, aunque presenta limitaciones para la cuantificación de partículas finas inhalables (ASTM D1739-98, 2017; Harrison, 2019).

La OMS indica que el muestreo pasivo es especialmente útil en zonas donde no se dispone de infraestructura para sistemas activos, debido a que se trata de un procedimiento económico y sencillo de aplicar. No obstante, esta técnica presenta limitaciones notables, como la incapacidad para medir con precisión fracciones finas inhalables ($PM_{2.5}$ y

PM₁₀) y la influencia de variables meteorológicas como el viento y la precipitación (WHO, 2021).

Tabla 1. Ventajas comparativas frente a métodos activos

Característica	Muestreo pasivo	Muestreo activo
Costo	Bajo	Alto
Energía Requerida	No	Si (bombeo)
Integración Temporal	Alta (Semanas / Meses)	Variable (Horaria a diaria)
Complejidad	Baja	Alta
Adecuado para	Monitoreo espacial amplio	Evaluaciones detalladas y temporales

Fuente: Elaboración Propia

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Ubicación de estudio

La presente investigación se llevo a cabo en el campus de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, institución situada en la región de Huánuco, Peru. Tal como se ilustra en la figura 1, dicha casa de estudios se encuentra en la provincia de Leoncio Prado, específicamente en el distrito de Rupa Rupa, dentro de la localidad de Tingo María.

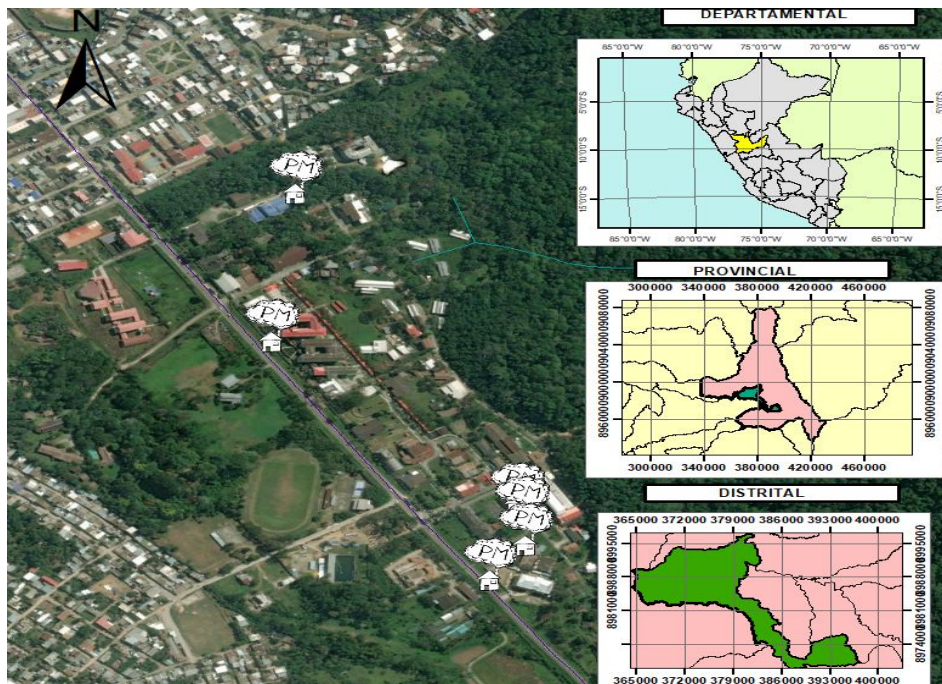


Figura 1. Ubicación geográfica de la Universidad Nacional Agraria de la Selva

3.1.1. Política

Desde una perspectiva político – administrativa, su emplazamiento se clasifica de la siguiente manera:

Región: Huánuco

Provincia: Leoncio Prado

Distrito: Rupa Rupa

Ciudad: Tingo María

3.1.2. Geografía

De acuerdo con la ubicación geográfica el ámbito experimental se encuentra en las siguientes coordenadas:

Tabla 2. Coordenadas geográficas del lugar de ejecución

Lugar	Coordenadas Geográficas		Altitud (msnm)
	Latitud (°)	Longitud (°)	
Tingo María	-9,29532	-75,99574	647

Fuente: Elaboración Propia

En la tabla 3 se enumeran los sitios escogidos para la vigilancia de partículas suspendidas en el área universitaria. El emplazamiento seleccionado ofrece condiciones óptimas para las mediciones, dado que no hay edificaciones próximas ni orígenes de contaminación directa que puedan distorsionar considerablemente los datos obtenidos.

Tabla 3. Georreferenciación de las estaciones seleccionadas para la evaluación ambiental

Puntos de Monitoreo	Lugar	Coordenadas Geográficas		Altitud (msnm)
		Latitud (°)	Longitud (°)	
P1	Laboratorio Antiguo de Calidad del Aire	390659	89702333	628
P2	Internado elefante blanco	390250,17	8970504,885	617

Fuente: Elaboración Propia

Como se puede apreciar en la figura 2 las posiciones de los dos sitios de vigilancia designados para la investigación. El lugar inicial, identificado como P1, corresponde al ex Laboratorio de Calidad del Aire. El segundo emplazamiento, llamado P2, este situado en las instalaciones del internado conocido como "Elefante Blanco". Además, el Laboratorio de Calidad del Aire se halla en el interior de la escuela profesional de ingeniería ambiental. En dicho laboratorio se realizaron las investigaciones correspondientes, que incluyeron cálculos, análisis de resultados y el uso de balanzas de precisión para determinar el peso del material particulado recolectado durante el monitoreo.

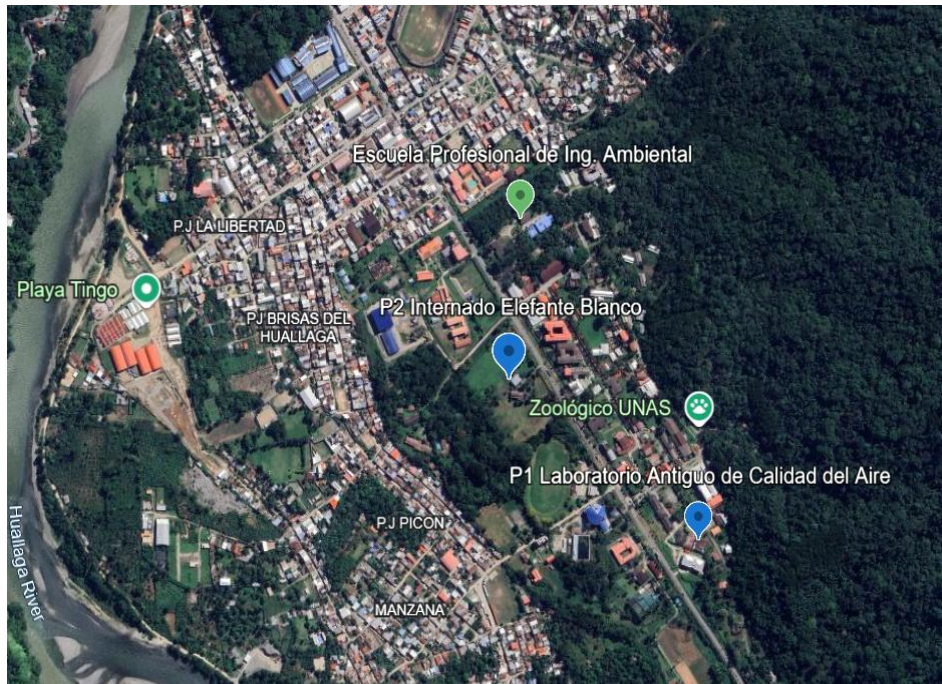


Figura 2. Posición de los dos puntos de monitoreo en el recinto universitario

3.2. Aspectos ambientales y sociales

3.2.1. Clima

La zona en la que se realizó el estudio exhibe un clima con características tropicales. En Tingo María, el mes más caluroso es octubre, con temperaturas que llegan a aproximadamente $31,93^{\circ}\text{C}$; mientras que julio muestra las lecturas térmicas mínimas, cercanas a $18,7^{\circ}\text{C}$. En lo que respecta a las lluvias, el volumen más elevado de precipitaciones se da en enero, con acumulaciones mensuales de alrededor de 451,08 mm, según informes del SENAMHI (2023).

Tabla 4. Registro de variables meteorológicas de la estación base en Tingo María

Año	Meses	Temperatura Del Aire ($^{\circ}\text{C}$)			Humedad Relativa Del Aire (%)	Precipitación (Mm)
		Máxima	Mínima	Media		
2023	OCTUBRE	31.93	21.25	26.59	79.37	218.18
	NOVIEMBRE	31.74	20.40	26.07	79.05	231.40
	DICIEMBRE	30.06	20.62	25.34	82.79	227.10
2024	ENERO	29.26	20.62	24.94	85.55	373.50

Fuente: Elaboración Propia

En la figura 3 vemos las anomalías de temperatura máxima ($^{\circ}\text{C}$) registradas en enero de 2023 para diez localidades de la región de Huánuco, Perú, entre las cuales se incluye Tingo María. Este valor es de 0.3 grados, es muy útil para evaluar impactos en agricultura, ecología o gestión de recursos hídricos.

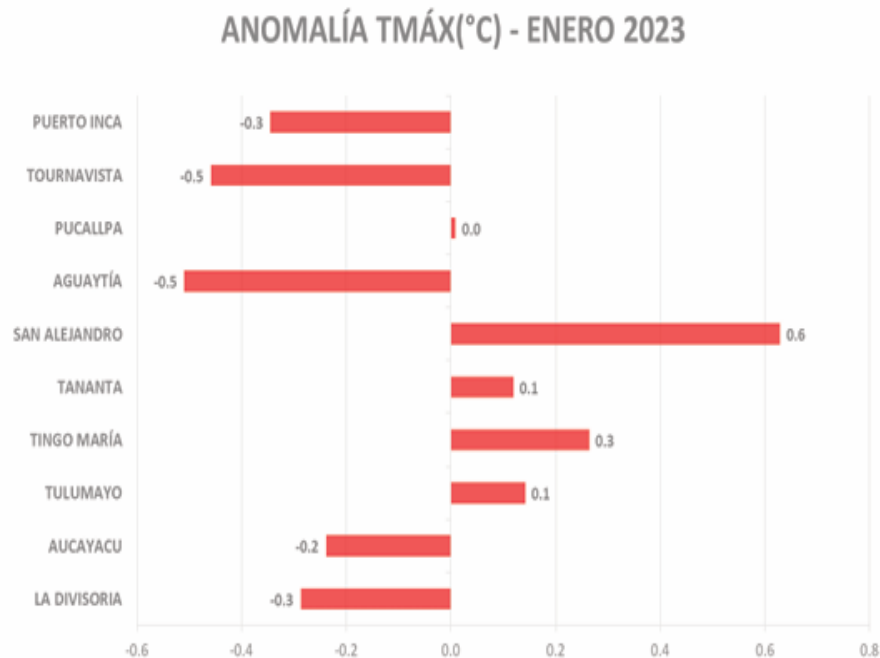


Figura 3. En enero 2023, se observaron fluctuaciones en las temperaturas máximas del aire en las regiones de selva alta y selva baja de Huánuco.

3.2.2. Viento

El viento en esta zona se ve afectado principalmente por la configuración del terreno y otros elementos ambientales. Tanto la dirección como la velocidad pueden experimentar cambios notables en lapsos breves, resultando mas inestables que los promedio por hora. En Tingo María, la velocidad promedio horaria del viento se mantiene bastante constante a lo largo del año, con variaciones de aproximadamente más o menos 0.6 km/h en torno a un valor medio de cerca de 5,1 km/h.

El pronóstico estacional del SENAMHI para el trimestre febrero – abril de 2023, en el ámbito de la Dirección Zonal 10, se prevén probabilidades elevadas de que las temperaturas mínimas se mantengan en niveles normales (46%) y una posibilidad similar de que excedan esos rangos habituales (44%) en localidades como Aguaytía, Tulumayo, Aucayacu y Tingo María

3.2.3. Población

La población de Tingo María durante los últimos cinco años ha crecido considerablemente, según INEI (2024) en el Compendio Estadístico Huánuco 2023 se recopilan datos de carácter demográfico, social, económico y financiero correspondientes al departamento de Huánuco. Esta publicación incluye información reciente relacionada con aspectos territoriales, ambientales, poblacionales, así como condiciones de vivienda y características de los hogares.

Tabla 5. Población total proyectada, densidad poblacional en el año 2022-2023.

Provincias	Superficie (kilómetros cuadrados) km ²	Año 2022		Año 2023	
		Población Total Proyectada 30/06/2022 (Habitantes)	Densidad poblacional (Habitantes por kilómetro cuadrado)	Población Total Proyectada 30/06/2023 (Habitantes)	Densidad poblacional (Habitantes por kilómetro cuadrado)
Leoncio Prado	4,942.89	140 453	28.42	141 195	28.57

Fuente: Instituto Nacional de Estadística e Informática - Perú: Estimaciones y Proyecciones de Población.

La tabla 6 presenta las consultas realizadas en unidades de salud correspondientes a niños menores de cinco años con infecciones respiratorias agudas, en el distrito de Rupa Rupa, abarcando el periodo de 2018 a 2022.

Tabla 6. Atenciones de niños(as) menores de 5 años afectados con infecciones respiratorias.

Provincia / Distrito	2018	2019	2020	2021	2022
Rupa-Rupa	2 364	3 356	385	775	3 018

Fuente: Dirección Regional de Salud Huánuco.

Desde 2019–2022, estas enfermedades respiratorias figuraron entre los diagnósticos más comunes en las causas de morbilidad de la población general. Entre los diagnósticos más frecuentes se identificaron en la tabla 7.

Tabla 7. Principales causas de Morbilidad, según diagnostico 2019-2022.

Diagnóstico	2019	2020	2021	2022
General				
Rinofaringitis aguda, rinitis aguda (J00X)	...	28669
Faringitis aguda, no especificada (J029)	...	28554
Infecciones agudas de las vías respiratorias superiores (J00 - J06)	234279	...	125562	208501

Fuente: Dirección Regional de Salud Huánuco - Sistema HIS - OITE.

En 2018 se registraron 16 casos, cifra que se redujo a 8 casos en 2019. En 2020, coincidiendo con el inicio de la pandemia por COVID-19 y las medidas restrictivas de movilidad, las atenciones disminuyeron aún más, llegando a solo 2 casos. Ver tabla 8.

Tabla 8. Población atendida con Neumonía, según provincia y distrito, 2018-2022.

Provincia / Distrito	2018	2019	2020	2021	2022
Rupa-Rupa	16	8	2	9	6

Fuente: Dirección Regional de Salud Huánuco.

3.2.4. Actividades socio económicas

En el distrito de Rupa Rupa se han identificado diversas problemáticas ambientales vinculadas a la gestión municipal. La municipalidad provincial de Leoncio Prado ha sido señalada por situaciones relacionadas con el manejo inadecuado de residuos, lo que ha generado impactos negativos en el entorno. En 2018, el Ministerio del Ambiente proclamó una situación de emergencia en el manejo de desechos sólidos, motivada por la eliminación inadecuada en el vertedero denominado “La Muyuna”, lo que generó impactos negativos en el río Huallaga y las áreas circundantes.

Además, en esta zona se han identificado diversos elementos que empeoran la calidad del medio ambiente. Entre los más destacados figuran la producción de sonidos fuertes, la descarga de aguas servidas sin procesamiento apropiado, el amontonamiento y la combustión no regulada de basura y residuos orgánicos, así como la cría incontrolada de mascotas. Ver tabla 9.

En resumen, estas situaciones demuestran que Rupa Rupa se enfrenta a múltiples retos ambientales, los cuales exigen enfoques comprensivos para optimizar el manejo de desechos, monitorear los orígenes de contaminación y ejecutar medidas preventivas enfocadas en salvaguardar la salud comunitaria y preservar el balance del ecosistema.

Tabla 9. Factores generadores de contaminación ambiental identificados por distrito 2022

Provincia / Distrito	Municipalidades que informaron que existen fuentes contaminantes en el distrito	Emanación de gases y partículas de fábricas o refineries	Emisión de gases de vehículos motorizados	Ruidos con alta intensidad que dañan la salud	Aguas residuales	Acumulación y quema clandestina de basura y rastrojos de basura y rastrojos	Deforestación y quema de bosques	Crianza de animales domésticos sin control
Rupa-Rupa	1	0	0	1	1	1	0	1

Fuente: Instituto Nacional de Estadística e Informática - Registro Nacional de Municipalidades 2022.

3.3. Aspectos geográficos

Geográficamente los laboratorios se encuentran ubicados al margen derecho del río Huallaga, al pie de la formación montañosa conocida como cerro cachimbo y frente a la cadena de montañas del parque nacional tingo maría.

3.4. Materiales y equipos

3.4.1. Materiales

Para el desarrollo del estudio se emplearon placas de vidrio, placas Petri de plástico, mechero, vaso precipitado, espátula, papel toalla, escobillas de cerdas, cooler, guardapolvo, guante quirúrgico, mascarilla, papel A4, lapiceros, plumón indeleble, etiquetas adhesivas, plumón de pizarra, papel toallas y tablero acrílico. Armazón de madera, calamina y clavos.

3.4.2. Equipos

En cuanto a los instrumentos, se utilizó una balanza analítica para la determinación del peso de las muestras y un sistema de posicionamiento global (GPS), una cámara fotográfica, pc y laptop ASUS.

3.4.3. Reactivos

Los reactivos utilizados fueron vaselina sin aroma 100 g 100% pura, el spray silicona, alcohol, lava vajilla y lejía.

3.4.4. Programa de computación

Se utilizaron los siguientes softwares como Microsoft Excel, Microsoft Word, Microsoft power point, sketchUp, software infostat y Google earth.

3.5. Tipo de investigación

Esta investigación adoptó un enfoque experimental y de campo, ya que involucro actividades de recolección, seguimiento y análisis de muestras obtenidas mediante la implementación de distintos procedimientos. A demás, se midió la densidad de polvo atmosférico que se deposita en una zona particular, llevando a cabo mediciones en dos ubicaciones elegidas de antemano.

La investigación abarco la evaluación comparativa de la eficacia de distintas técnicas para capturar partículas que se asientan, incluyendo placas recubiertas con vaselina, placas sin ningún adherente y placas tratadas con silicona en spray. Por último, se procedió a la medición cuantitativa del material particulado sedimentable en el campus de la Universidad Nacional Agraria de la Selva.

3.6. Variables en estudio

Para el desarrollo de la investigación se estudiaron las siguientes variables:

3.6.1. Variable independiente

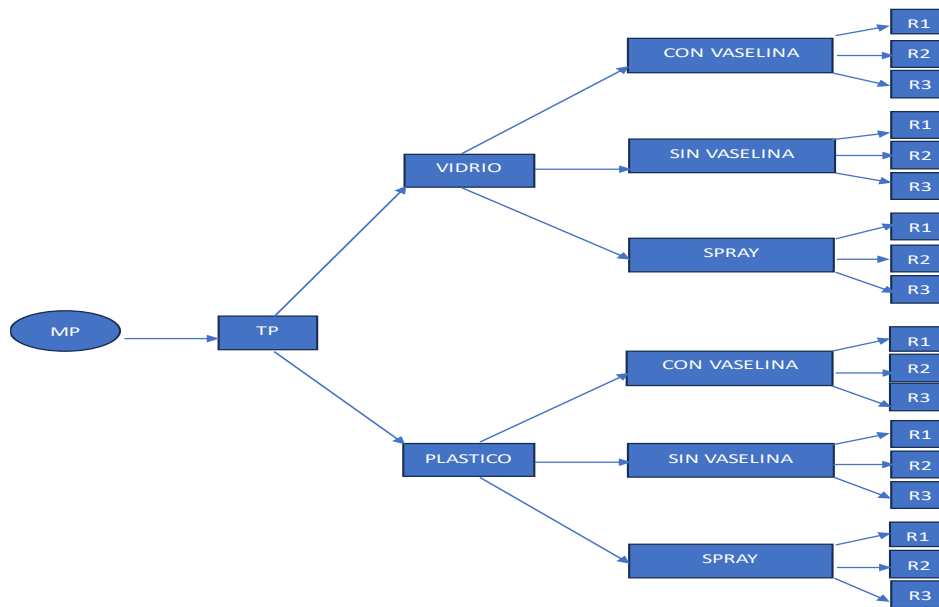
Técnicas de muestreo

3.6.2. Variable dependiente

Partículas atmosféricas sedimentables

3.7. Diseño de investigación

El desarrollo de la tesis se sustentó en un diseño metodológico representado en la figura 4. debido a que tiene como finalidad determinar la efectividad de las técnicas de muestreo con respecto al tipo de placas y el tipo de adherente y con sus respectivas repeticiones.



Donde: Material particulado (MP), tipo de placas (T.P) Repeticiones R(1,2,3)

Figura 4. Esquema del planteamiento de la investigación

3.8. Análisis estadístico

En esta investigación, se aplicó para los resultados un análisis de varianza (ANOVA), complementado con la prueba de comparación múltiple de tukey, considerando un nivel de confianza del 95% y un margen de error experimental 5%.

El tratamiento estadístico permitió evaluar si existían diferencias significativas entre los valores obtenidos de concentración de partículas atmosféricas sedimentables (PAS) al aplicar las distintas metodologías de muestreo, tal como se presenta en la tabla 10.

Para el cálculo se aplicó las siguientes ecuaciones:

Tabla 10. Análisis de la varianza

Fuente de variación	GL	SC	CM	Valor de F
Tratamiento	t-1	$\sum_{i=1}^t \frac{Y_i^2}{r} - \frac{Y^2}{tr}$	SC_{trat} / gl_{trat}	SM_{trat} / CM_{ee}
Error	t(r-1)	$SC_{total} - SC_{trat}$	SC_{ee} / gl_{ee}	
Total	t.r - 1	$\sum_{i=1}^t \sum_{j=1}^r Y_{ij}^2 - \frac{Y^2}{tr}$		

Fuente: Elaboración propia

a) Medio aritmética o media

$$\bar{X} = \frac{\sum X_i}{n} \quad (1)$$

Donde:

\bar{X} : Valor promedio de los datos.

X_i : representa el valor en un análisis.

n : Es el número de datos.

b) Varianza S^2

$$S^2 = \frac{\sum(\bar{x}_i - \bar{x})^2}{n - 1} \quad (2)$$

Donde:

S^2 : Varianza

\bar{x}_i : Media aritmética individual

\bar{x} : Media aritmética.

n : Número de datos o tamaño de muestra

c) Hipótesis estadística planteada

- Hipótesis Nula (H_0): No existe diferencia significativa en la concentración de partícula atmosférico sedimentable respecto a la evaluación de las metodologías empleadas.
- Hipótesis alternativa (H_a): Existe diferencia significativa en la concentración de partícula atmosférico sedimentable respecto a la evaluación de las metodologías empleadas.

d) Nivel de significación

Se da con la letra griega alfa y se especifica como la probabilidad que el investigador está dispuesto a estar equivocado. Generalmente, un investigador quiere estar dispuesto a estar equivocado el 5% del tiempo. El alfa es la expresión decimal de cuanto está dispuesto a estar equivocado. Para el ejemplo actual, el alfa es 0.05.

e) Con grados de libertad

$$gl = \frac{\left(\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}\right)^2}{\left(\frac{S_1^4}{n_1^2(n-1)} + \frac{S_2^4}{n_2^2(n-2)}\right)} \quad (3)$$

Redondeándose el valor obtenido a un número entero.

Donde:

gl: Grados de libertad

S²: Varianza

n: Número de datos o tamaño de la muestra

3.9. Metodología

El procedimiento basado en placas receptoras emplea una superficie sólida recubierta con una sustancia adherente, como vaselina, la cual actúa como medio de retención para capturar el polvo atmosférico sedimentable presente en el ambiente.

Para analizar la eficiencia de las técnicas utilizadas en la captación de estas partículas en el aire, se siguió una secuencia operativa estructurada, la cual se detalla en el esquema metodológico mostrado en la figura 5.



Figura 5. Procedimiento con placas receptoras

3.9.1. Concentración de material particulado en la casa de estudio Universidad Nacional Agraria de la Selva

a) Selección de las técnicas de muestreo

En este estudio para determinar el método mas efectivo, se implemento el protocolo definido por el SENAMHI, que se fundamenta en la medición de los niveles de partículas sedimentables atmosféricas (PAS) a través de placas colectoras.

Para lograrlo, se utilizaron dos tipos de materiales de recolección (vidrio y plástico) y se evaluaron dos clases de agentes adhesivos (vaselina y aerosol de silicona). Estos adhesivos actúan como el componente detector en la técnica, puesto que facilitan la captura de las partículas que se depositan en las placas.

Para la placa receptora de vidrio y plástico se obtuvo un área de 67.93 cm².

Tabla 11. Área para cada tipo de superficie de captación

Nº	METODOLOGÍA SENAMHI	MATERIAL	ÁREA (cm ²)
1	Placas Receptoras	Vidrio	67.93
2	Placas Receptoras	Plástico	67.93

Fuente: elaboración propia

b) Selección de la estación de monitoreo para los tipos de superficie de captación

En las dos metodologías empleadas, se utilizaron criterios uniformes para el emplazamiento de los puntos de observación. Se eligieron dos ubicaciones concretas: el antiguo laboratorio de control de la calidad atmosférica y el internado Elefante Blanco. Estos lugares fueron escogidos debido a su condición de espacios abiertos, libres de impedimentos próximos y exentos de registros de alteraciones por actos vandálicos o fuentes contaminantes que pudiesen influir en las mediciones.

c) Instalación de las placas receptoras

Antes de su exposición, las placas se sometieron a un proceso de lavado con un liquido limpiador y. acto seguido, se dejaron reposar durante un día entero en un horno para secarse. Una vez transcurrido este tiempo, las placas se transfirieron a un desecador con el

fin de evitar la absorción de humedad ambiental y garantizar condiciones estables antes del pesaje. Posteriormente, se verificó que cada una presentara un estado impecable.

Se pesó las placas de vidrio y plástico sin adherente en la balanza analítica con una precisión de más menos 0.0001g. Para la implementación de la vaselina, este material se calentó previamente mediante una llama o una cocina eléctrica hasta lograr una textura líquida, lo que facilitó su extensión pareja sobre ambas clases de superficies colectoras. A continuación, se procedió a asignar códigos y a registrar el peso inicial mediante la balanza analítica.

En cuanto a la silicona en spray, las placas designadas se pesaron en primer y, después, se aplicó una capa uniforme del producto, garantizando que abarcara completamente la superficie sin residuos evidentes. Por último, se llevó a cabo la codificación y el pesaje inicial en la balanza analítica.

Por el método gravimétrico se determinó el peso inicial (W_i), usando la balanza analítica del laboratorio de calidad del aire, el cálculo se realizó con la siguiente ecuación.

$$W_i = W_p + W_v \quad (1)$$

Donde:

W_i : Peso inicial (mg), este es después de salir del laboratorio.

W_p : Peso de placa (mg)

W_v : Peso de vaselina (mg)

d) Monitoreo de las partículas atmosféricas sedimentables mediante el método de placas receptoras

Para el traslado de las 36 placas ya acondicionadas y previamente pesadas se utilizó un cooler, con el fin de mantenerlas protegidas hasta su instalación en los puntos de evaluación. Donde 18 placas estuvieron en el P1 (Laboratorio antiguo de calidad del aire) y los 18 restantes en el P2 (Internado elefantes blancos). La concentración de material particulado estuvo dentro de un periodo de 1 mes. Al cumplirse el primer mes, las placas fueron retiradas y sustituidas de inmediato por otras 18 nuevas, cada una con su respectivo adherente. Estas permanecieron en campo durante el mes siguiente, siguiendo el mismo procedimiento.

e) Diseño y construcción del soporte las placas receptoras

Para sostener las placas receptoras de PAS se construyó una estructura de madera constituido de 4 bastones de madera con una altura de 1.40 m y una plataforma inferior de 80 x 60 cm. Ver Figura 6.

Asimismo, con el propósito de evitar la entrada de residuos de gran tamaño que pudieran interferir con los resultados, se instaló un techo de calamina de 1.20 x 1.00 m. como elemento de protección.

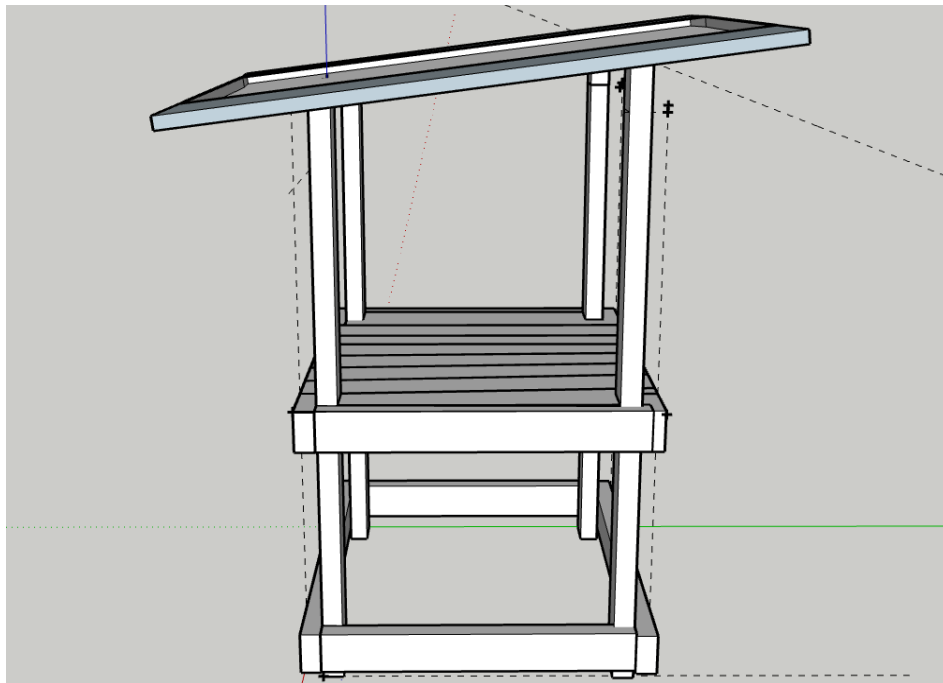


Figura 6. Soporte diseñado para las placas receptoras en el punto P1

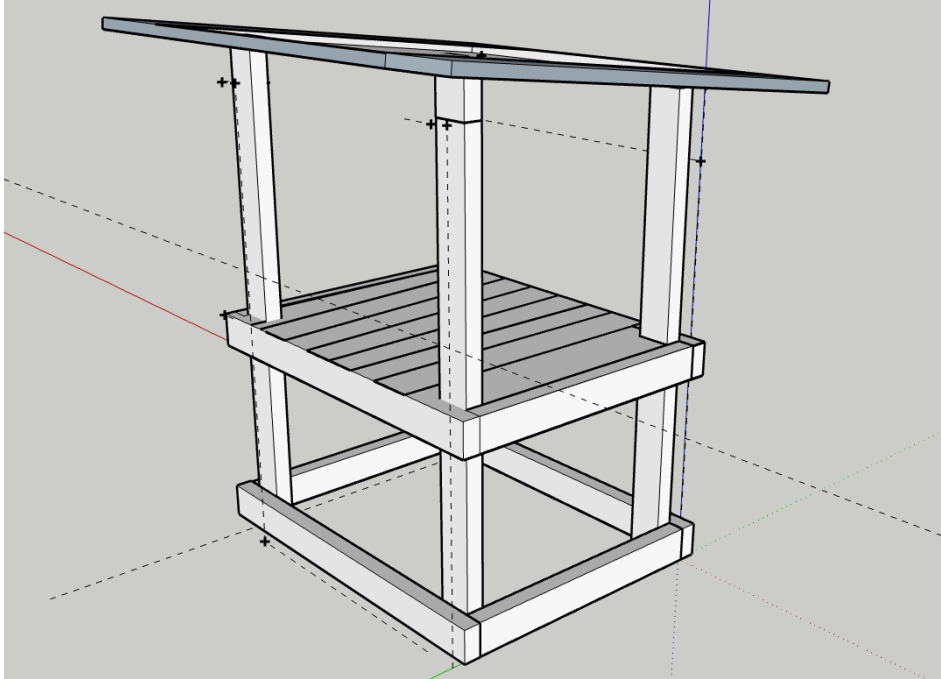


Figura 7. Soporte creado para las placas receptoras en el lugar P2

f) Recojo de muestras

Al término del periodo de exposición se recogió las muestras en un cooler para evitar contaminar la muestra, se trasladó con cuidado al laboratorio de calidad del aire.

Una vez llevada las placas al laboratorio se pesó cuidadosamente en la balanza analítica y se anotaron los respectivos pesos de acuerdo con cada tipo de superficie de captación. Se determino el peso final de las placas con la siguiente ecuación:

$$W_f = W_p + W_v + W_{pas} \quad (2)$$

Donde:

Wf: Peso final (mg), es después de estar expuesto durante un mes

Wv: Peso de vaselina (mg)

Wp: Peso de placa (mg)

Wpas: Peso del polvo atmosférico sedimentable (mg)

Para obtener el peso de partículas atmosféricas sedimentables, se realizó el siguiente cálculo.

$$W_{pas} = \Delta W = W_f - W_i \quad (3)$$

Donde:

WPAS: Peso de polvo atmosférico sedimentable (mg)

ΔW : Diferentes entre peso inicial y final (mg)

Wi: Peso inicial (mg)

Wf: Peso final (mg)

Luego, se determinó las concentraciones de PAS en (mg/ cm²/ mes) mediante el siguiente cálculo.

$$C_1 = \left(\frac{\Delta W}{A} \right) / Mes \quad (4)$$

Donde:

C₁: Concentración de PAS (mg/cm²/mes)

ΔW: Diferentes entre peso inicial y final (mg)

A: Área de la placa = π.r² (cm²)

π: 3.1416

g) Procesamiento y análisis de datos

Posteriormente concluida la etapa de recolección de datos en campo se graficó y comparo mediante análisis estadístico los meses con mayor concentración y variabilidad en el tiempo según técnicas.

En cuanto al procesamiento de la información, se elaboro una base de datos en Microsoft Excel para organizar los registros de los meses evaluados. El tratamiento de los datos incluyo la organización y codificación de la información, su respectiva tabulación, la representación grafica de los resultados mediante el software InfoSat y, finalmente, el análisis e interpretación de los valores obtenidos, considerando los datos más representativos y recurrentes.

3.9.2.Efecto del tipo de superficie de captación de muestra en la concentración de partículas atmosféricas sedimentables.

Con los datos obtenidos, se determinó una tasa o proporción de adherencia asimismo comparó entre las diversas técnicas esto se realizó mediante la formula (5) o (6).

$$Y\% = \left(\frac{\Delta Tr \times 100}{Wmáx} \right) \quad (5)$$

Donde:

Y%: Peso de tratamiento para el tipo de superficie de captación

ΔTr: Variación de captación

Wmáx: Concentración máxima para el tipo de superficie (mg)

$$PAS (NC) = \frac{(\Delta Cm) \times 100}{PAS (máx)} \quad (6)$$

Donde:

PAS (NC) : Partículas atmosféricas sedimentables no captados

ΔC_m : Variación de captación de material particulado

PAS máx: Concentración máxima para el tipo de superficie (mg)

3.9.3. Efecto de los adherentes en la concentración de partículas atmosféricas sedimentables

Con los datos obtenidos, se determinó una tasa o proporción de adherencia, asimismo comparó entre las diversas técnicas realizadas por la formula (7) o (8).

$$Y\% = \left(\frac{\Delta Tr \times 100}{W_{m\acute{a}x}} \right) \quad (7)$$

Donde:

Y%: Peso del tratamiento para el tipo de adherentes

ΔTr : Variación de captación

$W_{m\acute{a}x}$: Concentración máxima para el tipo de adherentes (mg)

$$PAS(NC) = \frac{(\Delta C_m) \times 100}{PAS(m\acute{a}x)} \quad (8)$$

Donde:

PAS (NC) : Partículas atmosféricas sedimentables no captados

ΔC_m : Variación de captación de material particulado

PASmáx: Concentración máxima para el tipo de adherentes (mg)

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Determinar la concentración de material particulado en la Universidad Nacional Agraria de la Selva.

La figura 8 ilustra las concentraciones medias de material particulado captadas en las ubicaciones P1 (Laboratorio) y P2 (Internado) a lo largo de los meses de noviembre, diciembre y enero. Los resultados revelan que el sitio P2 exhibió niveles más elevados que P1, con una acumulación de 0,32 mg/cm²/mes, cifra que se acerca al umbral superior establecido por la Organización Mundial de la Salud (OMS) de 0,5 mg/cm²/mes, sin llegar a excederlo.

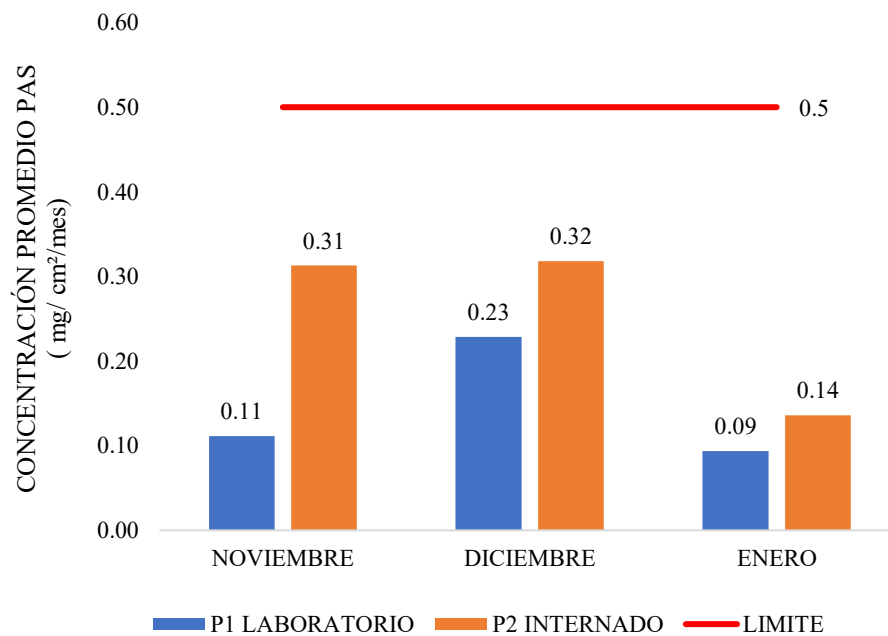


Figura 8. Concentración promedio de PAS en dos Puntos de muestreo.

Según el estudio realizado por Zevallos Luz Belinda 2022, correspondiente al mismo lapso temporal, las lluvias generalmente promueven la reducción de partículas suspendidas al favorecer su asentamiento y transporte hacia el suelo. Sin embargo, en diciembre se observaron valores más altos (por encima del límite OMS), lo que la autora relaciona con aumento de tráfico vehicular, actividades comerciales y condiciones meteorológicas locales. En concordancia con los hallazgos de este análisis, la figura 8 puede explicarse en función de las

condiciones climáticas, especialmente la precipitación. El trimestre Noviembre-Enero coincide con el inicio pleno de la estación lluviosa en Tingo María y la selva alta de Huánuco, por lo que se registran precipitaciones significativas.

Los resultados evidencian que diciembre presentó la acumulación más elevada de PAS en ambas ubicaciones estudiadas, excediendo las cifras correspondientes a noviembre y enero. A pesar de ello, aunque se observaron variaciones entre los meses examinados, todas las lecturas permanecieron inferiores al límite superior establecido de 0,5.

En la Figura 9 se muestran las concentraciones de material particulado sedimentable, durante el mes de diciembre P2 los resultados evidencian que las placas de vidrio registraron mayores concentraciones de PAS en comparación con las placas de plástico en todos los tipos de adherente PSV (Sin Vaselina), PCV (Con Vaselina) y PCS (Con Spray). El mayor valor de concentración se observa en el adherente PCS (Con Spray), donde las placas de vidrio alcanzaron 0,49 mg/cm²/mes valor que se aproxima al límite establecido por la OMS.

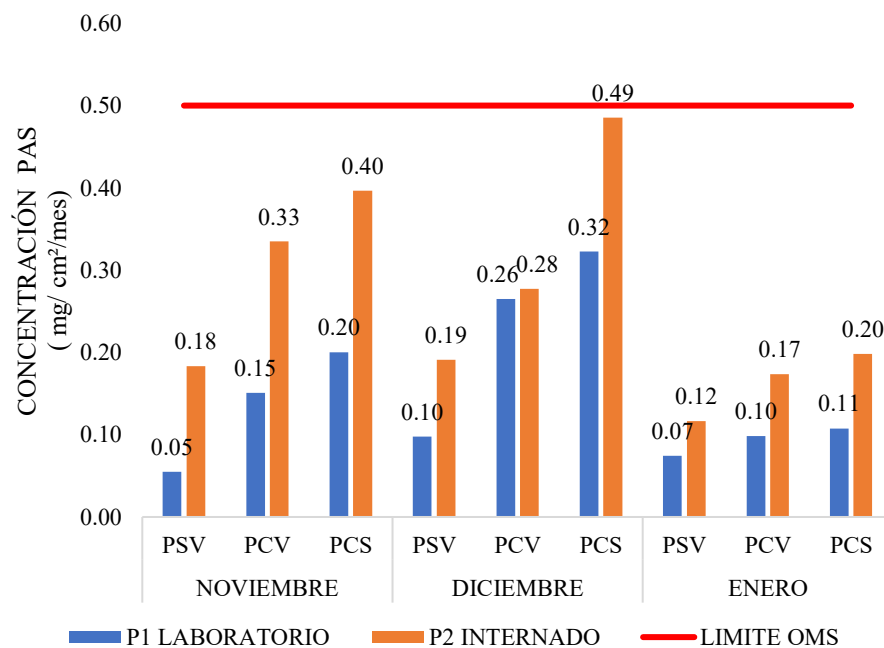


Figura 9. Concentraciones de PAS noviembre, diciembre y enero

Este incremento puede sustentarse con antecedentes que vinculan la deposición de partículas con distintas fuentes: por un lado, la quema de desechos al aire libre representa una práctica que puede provocar aumentos súbitos y considerables de partículas que se depositan, particularmente en zonas suburbanas, como lo documentan Krecl et al (2021) y Popoola et al. (2023) en análisis de deposición durante temporada seca, la utilización de fuegos artificiales en épocas de celebración genera picos de partículas finas y ultrafinas. El valor elevado observado en diciembre en el Punto 2 puede explicarse por una combinación de factores: tránsito vehicular interno, capacidades de depósito amplificadas por eventos de quema o pirotecnia, y condiciones climáticas que favorecen la captación en placas receptoras en ese periodo.

Los resultados también se relacionan con investigaciones realizadas donde la carga de partículas está fuertemente influenciada por fuentes antrópicas. Estudios como los de Popoola et al. (2023) y Krecl (2021) demuestran que actividades como la quema de residuos sólidos y el tráfico vehicular generan incrementos significativos de material particulado, tanto fino como sedimentable. Estas condiciones son comparables a las observadas en el entorno de la UNAS, donde la resuspensión del polvo del suelo, la circulación vehicular y las condiciones climáticas locales contribuyen a la variabilidad de las concentraciones de PAS.

4.2. Analizar el efecto del tipo de superficie de captación de muestra en la concentración de partículas atmosféricas sedimentables.

En la figura 10 presentan las concentraciones promedio de partículas atmosférica sedimentable registradas durante noviembre, diciembre y enero, empleando dos tipos de superficies de captación siendo estos plástico y vidrio. Los resultados evidencian que la superficie de plástico presento la menor captación con una cifra de 0.1134 mg/cm²/mes, en tanto que el vidrio logro la recolección más alta durante diciembre, alcanzando 0,3015 mg/cm²/mes.

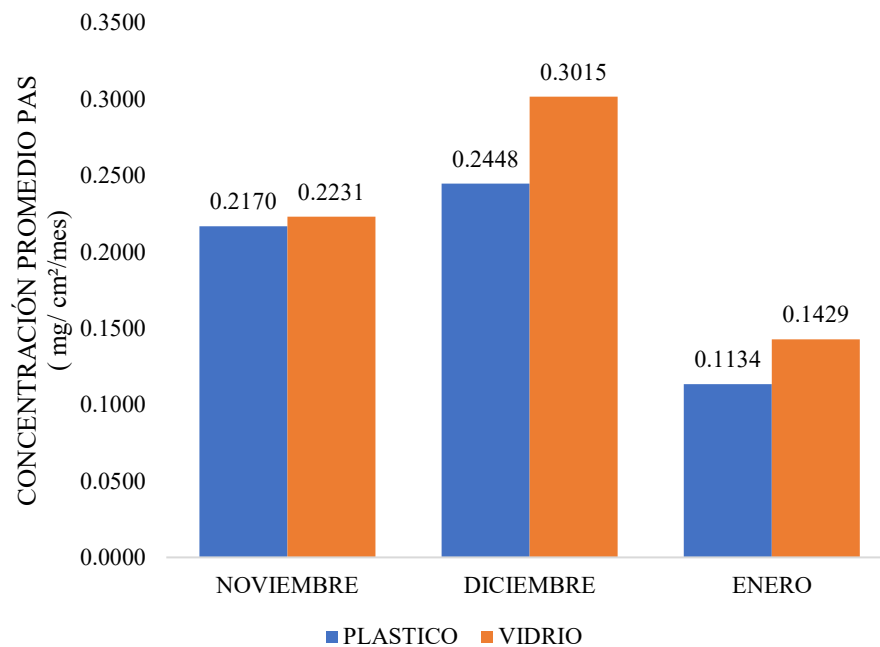


Figura 10. Concentración de PAS según el tipo de superficie de captación.

En la figura 11 se muestran las concentraciones de partículas atmosféricas sedimentables registradas en los meses de noviembre, diciembre y enero, empleando dos tipos de captación placas de plástico y placas de vidrio. Los resultados evidencian que las concentraciones en placas de vidrio fueron superiores, alcanzando valores hasta 0.4 mg/cm²/mes, lo que evidencia una mayor eficiencia de captación de este tipo de superficie. Por el contrario, las placas de plástico registraron las menores concentraciones de PAS en la mayoría de las repeticiones, con valores que oscilaron entre 0.15 y 0.2 mg/cm²/mes, evidenciando una menor capacidad de retención de partículas sedimentables en comparación con el vidrio.

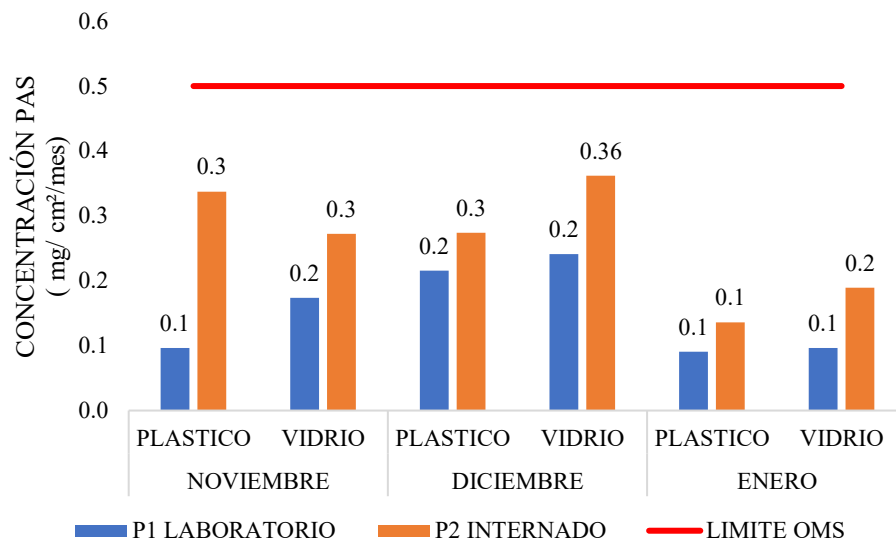


Figura 11. Concentraciones de PAS según tipo de superficie plástico-vidrio

En términos generales, el análisis comparativo Figura 10 y 11 demuestra que el tipo de superficie de captación influye significativamente en la concentración de PAS registrada, siendo las placas de vidrio las que captan mayor cantidad de material particulado, mientras que las placas de plástico presentan una menor eficiencia de captación. Estos resultados se asocian a las propiedades físicas del vidrio, como su mayor estabilidad superficial y capacidad de retención de partículas, lo que favorece la deposición del material particulado sedimentable en el punto de monitoreo evaluado. Estudios como los de Beamer et al. (2014) y metodologías empleadas por organismos como el SENAMHI destacan que el vidrio, debido a su mayor energía superficial, menor porosidad y estabilidad físico-química, favorece la adhesión de partículas mediante fuerzas de van der Waals y capilares, especialmente en condiciones de humedad relativa elevada. En contraste, las superficies plásticas (polipropileno o poliestireno) presentan una menor energía superficial.

Lara et al. (2025), quienes destacan que el poliestireno vinílico material comúnmente utilizado en placas receptoras presenta baja porosidad y una superficie homogénea, características favorables para aplicaciones microbiológicas. Sin embargo, dichas propiedades también pueden limitar la retención de partículas sedimentables, especialmente en condiciones ambientales abiertas, ya que una superficie menos rugosa reduce la adherencia mecánica del polvo atmosférico. En contraste, las placas de vidrio al presentar mayor energía superficial y menor interacción con la humedad ambiental, favorecen una captación más estable del material particulado, lo que explicaría las mayores concentraciones observadas en este estudio.

Los antecedentes revisados Krecl et al. (2021) y Popoola et al. (2023) indican que las condiciones climáticas, como la humedad y las precipitaciones características de los meses de diciembre y enero en Tingo María, influyen directamente en la captación de PAS, ya que la alta humedad relativa favorece la formación de puentes capilares, incrementando la adhesión de partículas sobre superficies hidrofílicas como el vidrio, lo que explicaría los valores más elevados registrados en este tipo de placas.

Además, tal como se detalla en la tabla 12, el p- valor vinculado al estadístico F es de al menos 0,05. Esto sugiere que, con un intervalo de confianza del 95%, no existen discrepancias estadísticamente relevantes entre los promedios de PAS de los diversos tipos de superficie analizados.

Tabla 12. ANOVA para PAS según el tipo de superficie de captación (soporte)

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	0.0256071	1	0.0256071	1.53	0.2193
Intra grupos	1.77773	106	0.0167711		
Total (Corr.)	1.80334	107			

Fuente: elaboración propia

4.3. Analizar el efecto de los adherentes en la concentración de partículas atmosféricas sedimentables.

En la Figura 12 se observa el efecto del tipo de adherente sobre la concentración de partículas atmosféricas sedimentables (PAS) en los puntos P1 (Laboratorio) y P2 (Internado). Los resultados evidencian que las placas sin vaselina (PSV) registraron valores menores, al incorporar vaselina PCV las concentraciones aumentaron notablemente, alcanzando 0,4 mg/cm²/mes lo que demuestra que la vaselina mejora significativamente la retención de partículas sedimentables. El uso de spray PCS registro el valor más alto 0,60 mg/cm²/mes, evidenciando que este tipo de adherente favorece una mayor captación de material particulado.

Correspondiente a enero 2024, se observa que las placas sin vaselina PSV presentaron los valores más bajos, con concentraciones cercanas a 0,08 mg/cm²/mes en P1 y 0,10 mg/cm²/mes P2. Aunque las concentraciones en comparación con los meses anteriores fueron menores, los resultados confirman que el uso de adherentes sigue influyendo positivamente en la captación de partículas atmosféricas, manteniéndose el mismo patrón de eficiencia observado en los meses anteriores.

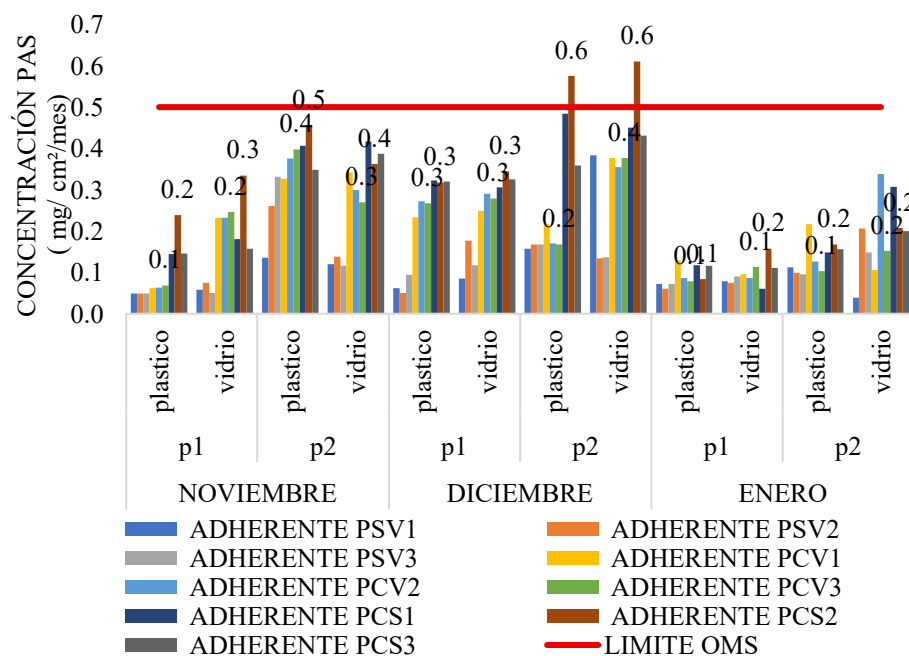


Figura 12. Concentraciones de PAS noviembre- enero según el tipo de adherente

El análisis de las graficas indica que el tipo de adherente empleado tiene un efecto importante en la cantidad de partículas atmosféricas sedimentables (PAS) retenidas por las placas, evidenciándose variaciones en las concentraciones registradas según el producto

utilizado, observándose un incremento progresivo de las concentraciones al pasar de superficies sin vaselina PSV a superficies con vaselina PCV y finalmente a superficies con spray PCS. Esta tendencia se mantuvo de forma consistente durante los meses de noviembre y diciembre de 2023, así como en enero 2024 aun cuando las concentraciones absolutas disminuyeron en este último mes. Adams et al. (2015) destacan que los recubrimientos adhesivos favorecen la retención no solo de partículas gruesas, sino también de partículas finas asociadas a material biológico, debido al incremento del contacto efectivo entre la partícula y la superficie colectora. Esto coincide con los resultados mostrados en esta investigación.

Según lo detallado en la tabla 13, el p-valor vinculado a la prueba F resulta menor a 0,05, lo cual confirma que, con un intervalo de confianza del 95%, se detectan discrepancias estadísticamente relevantes entre los promedios de PAS de los diversos tipos de adhesivo analizados.

Tabla 13. ANOVA para PAS según el tipo de adherentes

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	0.496865	3	0.165622	13.18	0.0000
Intra grupos	1.30648	104	0.0125623		
Total (Corr.)	1.80334	107			

Fuente: elaboración propia

Los intervalos exhibidos se sustentan en la prueba de comparación múltiple HSD de Tukey. Se elaboran de modo que, si no existieran diferencias auténticas entre las medias, dichos intervalos se solaparían en el 95% de las situaciones.

Tabla 14. Pruebas de Múltiple Rangos para PAS por Adherente

Adherente	Casos	Media	Grupos Homogéneos
Sin Vaselina (Plástico)	18	0.115833	X
Sin Vaselina (Vidrio)	18	0.123611	X
Con Vaselina	36	0.216694	X
Spray	36	0.284944	X

Fuente: elaboración propia

Según investigaciones previas realizadas por Carranza et al. (2021) y Cortez (2020), muestran que las placas colectoras tratadas con vaselina presentan un mayor rendimiento en la

captura de polvo sedimentable, reduciendo las pérdidas por acción del viento y la resuspensión. El mejor desempeño observado en las placas tratadas con silicona en spray se explica por su mayor capacidad de adhesión superficial y resistencia a la humedad, lo cual es consistente con los principios físicos descritos por Cho et al. (2021). Dichos autores demostraron que el incremento de la humedad relativa aumenta las fuerzas capilares entre partículas y superficies, favoreciendo su adhesión y reduciendo la resuspensión. En este contexto el spray actúa como una barrera hidrofóbica que mantiene la eficiencia de captación incluso en condiciones de elevada humedad ambiental, características propias de la zona de estudio.

Bekir et al. explican que el aceite de silicona forma una película continua y homogénea que incrementa la energía superficial del vidrio, facilitando la adhesión de partículas de diferentes tamaños y reduciendo su remoción por acción del viento o vibraciones. Este fenómeno permite comprender por qué en el presente estudio las placas con silicona en spray superaron tanto a las placas con vaselina como a las placas sin adherente, especialmente durante noviembre y diciembre, cuando la resuspensión de partículas en el aire es más intensa.

En conjunto, los antecedentes de Adams, Bekir y Baranyai respaldan estos hallazgos, evidenciando que la eficiencia en la retención de partículas atmosféricas sedimentables (PAS) depende no solo del entorno y las fuentes de emisión, sino también del tipo de superficie y del imprégnate utilizado. La mayor eficiencia observada en las placas tratadas con silicona en spray puede atribuirse a la formación de una película uniforme con alta capacidad adhesiva, mientras que la vaselina, aunque efectiva presenta una menor homogeneidad superficial y una mayor susceptibilidad a la saturación. Por ello, estos hallazgos destacan la importancia de seleccionar cuidadosamente el recubrimiento de las placas para garantizar resultados confiables en los programas de monitoreo de PAS.

4.4. Determinar la efectividad de dos técnicas de muestreo de partículas atmosféricas sedimentables del aire en las instalaciones de la Universidad Nacional Agraria de la Selva.

La Tabla 15, comparación múltiple mediante el procedimiento HSD de Tukey indica las diferencias calculadas entre los promedios de concentración de partículas atmosféricas sedimentables (PAS), obtenidas a partir de las dos técnicas de muestreo evaluadas, considerando tanto el uso de impregnantes (vaselina y spray) como el tipo de superficie de captación (plástico y vidrio).

Los resultados revelan que cuatro de los contrastes presentan diferencias significativas desde el punto de vista estadístico ($p < 0,05$), lo cual se evidencia mediante el asterisco (*) en la columna de significancia. En partículas se observa que las técnicas que emplean impregnantes presentan concentraciones de PAS significativamente mayores en comparación con las técnicas sin impregnante, tanto en superficies plásticas como de vidrio.

La técnica con aplicación de spray mostro diferencias significativas frente a las superficies sin vaselina (plástico y vidrio), registrando mayores concentraciones de PAS captadas, por otro lado no se observaron diferencias relevantes entre las placas de plástico y vidrio cuando ambas se evaluaron sin impregnantes, lo que indica un comportamiento similar en ausencia de adherentes.

Tabla 15. Comparación múltiple de dos técnicas de muestreo

Contraste	Sig.	Diferencia	+/- Límites
Con Vaselina - Sin Vaselina (Plástico)	*	0.100861	0.0844789
Con Vaselina - Sin Vaselina (Vidrio)	*	0.0930833	0.0844789
Con Vaselina - Spray		-0.06825	0.0689767
Sin Vaselina (Plástico) - Sin Vaselina (Vidrio)		-0.00777778	0.0975478
Sin Vaselina (Plástico) - Spray	*	-0.169111	0.0844789
Sin Vaselina (Vidrio) - Spray	*	-0.161333	0.0844789

Fuente: elaboración propia

La tabla 16 presenta las concentraciones de partículas atmosféricas sedimentables (PAS) registradas durante los meses de noviembre y diciembre 2023 y enero de 2024, en dos puntos de evaluación (P1 Y P2), empleando superficies de plástico y vidrio bajo tres modalidades de captación pasiva: sin adherente (T0), con vaselina (T1) y con silicona en spray (T2). La técnica que empleo silicona en spray presento los valores más elevados del periodo evaluado, destacando registros superiores en comparación con las otras dos modalidades. El máximo valor observado se registro en diciembre en el punto P2 sobre superficie de vidrio, lo que evidencia una mayor capacidad de fijación de partículas bajo esta condición.

Los promedios generales muestran una tendencia ascendente entre tratamientos, siendo menores en T0, intermedios en T1 y mayores en T2, lo que confirma que la incorporación de un adherente favorece la captación del material particulado sedimentable.

Tabla 16. Concentración de PAS (mg/cm² /mes) según técnica de muestreo pasivo

MESES	PUNTOS DE MONITOREO	SUPERFICIE	ADHERENTE								
			sin vaselina (T0)			con vaselina (T1)			con silicona en spray (T2)		
			PSV 1	PSV 2	PSV 3	PCV 1	PCV 2	PCV 3	PCS 1	PCS 2	PCS 3
NOVIEMBRE	p1	plástico	0.05	0.05	0.05	0.06	0.06	0.07	0.14	0.24	0.15
		vidrio	0.06	0.08	0.05	0.23	0.23	0.25	0.18	0.33	0.16
	p2	plástico	0.14	0.26	0.33	0.33	0.38	0.40	0.41	0.46	0.35
		vidrio	0.12	0.14	0.12	0.34	0.30	0.27	0.42	0.36	0.39
DICIEMBRE	p1	plástico	0.06	0.05	0.09	0.23	0.27	0.27	0.32	0.32	0.32
		vidrio	0.09	0.18	0.12	0.25	0.29	0.28	0.31	0.34	0.33
	p2	plástico	0.16	0.17	0.17	0.22	0.17	0.17	0.48	0.58	0.36
		vidrio	0.38	0.13	0.14	0.38	0.35	0.38	0.45	0.61	0.43
ENERO	p1	plástico	0.07	0.06	0.07	0.13	0.09	0.08	0.12	0.08	0.12
		vidrio	0.08	0.08	0.09	0.10	0.09	0.11	0.06	0.16	0.11
	p2	plástico	0.11	0.10	0.10	0.22	0.13	0.10	0.15	0.17	0.16
		vidrio	0.04	0.21	0.15	0.11	0.34	0.15	0.31	0.21	0.20
Promedio			0.12			0.22			0.29		

Fuente: Elaboración propia

En la tabla 17 se muestra el contraste porcentual entre las técnicas de muestreo muestra que la mayor coincidencia se obtuvo al comparar el método con silicona en spray y el que emplea vaselina, alcanzando un 76.01 %. En segundo lugar, la relación entre vaselina y la técnica sin adherente presento un nivel intermedio de aproximación (55.25%). Por el contrario, la menor correspondencia se observo entre el spray y el tratamiento sin recubrimiento, con un 41.99%. Estos resultados indican que los métodos que incorporan algún tipo de adherente tienden a mostrar comportamientos mas cercanos entre sí en términos de captación de partículas.

Tabla 17. Índice porcentual de similitud entre técnicas de muestreo pasivo de PAS

Comparación de técnicas	Similitud Porcentual (%)	
Spray - vaselina	76.01147776	%
Vaselina - sin adherente	55.24726312	%
Spray-sin adherente	41.99426112	%

Fuente: Elaboración propia

V. CONCLUSIONES

Se determinó que las mayores concentraciones de PAS se registraron en los meses de diciembre de 2023 y enero de 2024, periodo que coincide con condiciones de alta humedad relativa y precipitaciones características de la zona de Tingo María, lo cual favorece la deposición y adherencia de partículas sobre las superficies de captación. Estos resultados confirman que la dinámica del material particulado en el campus universitario está influenciada por factores meteorológicos locales y por las actividades antrópicas presentes en el entorno. Durante los meses evaluados, las concentraciones registradas en el mes de diciembre 2023 oscilaron entre 0,15 y 0,60 mg/cm²/mes, este último pasando el límite de referencia indicado por la OMS.

Como conclusión, se establece que tanto el vidrio como el plástico presentan un comportamiento similar en la captación de PAS, ya que no se evidenciaron diferencias estadísticamente significativas. Aunque en algunos casos las placas de vidrio registraron valores promedio ligeramente superiores, dichas variaciones se encuentran dentro del margen de error experimental, por lo que no es posible afirmar una superioridad técnica de un tipo de superficie sobre otro.

El análisis de los resultados evidencia que la aplicación de adherentes incrementa de manera significativa la eficiencia de captación de partículas atmosféricas sedimentables, observándose un mayor desempeño en las placas tratadas con silicona en spray (PCS), seguidas por las placas impregnadas con vaselina (PCV), en comparación con las placas sin adherente (PSV). El análisis estadístico mediante ANOVA evidenció que el valor de significancia obtenido es menor a 0.05 lo que indica la existencia de diferencias estadísticamente significativas en la concentración de partículas atmosféricas sedimentables (PAS) en función del tipo de adherente utilizado, con un nivel de confianza del 95%. Este resultado confirma que el tipo de adherente influye de manera significativa en la captación de PAS. Asimismo, la prueba de Tukey permitió identificar las diferencias específicas entre los tipos de adherentes evaluados.

En función de los resultados obtenidos en la prueba HSD de Tukey, se determinó que las técnicas de muestreo que incorporan impregnantes (vaselina y spray) son significativamente más efectivas en la captación de partículas atmosféricas sedimentables que las técnicas sin impregnante, independientemente del tipo de superficie utilizada (plástico o vidrio).

Se concluye que la efectividad de las técnicas de muestreo pasivo con spray y vaselina presentó una similitud porcentual del 76% durante el periodo noviembre 2023 – enero 2024 en las instalaciones de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, superando el valor referencial del 70% planteado en la hipótesis, por lo que se acepta la hipótesis de investigación.

En conjunto, estos resultados permiten concluir que la técnica de muestreo más efectiva para la captación de partículas atmosféricas sedimentables en la UNAS es aquella que incorpora impregnantes, especialmente la silicona en spray, consolidándose como una alternativa más eficiente frente a las técnicas tradicionales sin adherente.

VI. PROPUESTAS A FUTURO

Implementar un mecanismo de seguimiento continuo de partículas atmosféricas sedimentables en el ambiente dentro de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, con el fin de generar una base de datos histórica que permita evaluar tendencias temporales y estacionales de la calidad del aire.

Ampliar el número de puntos de monitoreo dentro y fuera del campus universitario, incluyendo zonas con mayor influencia de actividades vehiculares y urbanas, para obtener una caracterización espacial más representativa de contaminación atmosférica en la ciudad de tingo maría.

Evaluar la eficiencia de otros tipos de superficies de captación y nuevos adherentes, con el propósito de optimizar las técnicas de muestreo pasivo y reducir costos operativos en estudio de calidad del aire.

Complementar el monitoreo de partículas atmosféricas sedimentables con el análisis de material particulado fino (PM10 y PM2.5), a fin de establecer una evaluación integral de los riesgos asociados a la contaminación atmosférica que puede generar en la salud de la población.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Adams, R. (2015). Passive dust collectors to assess airborne microbial material. Estados Unidos. National Center for Biotechnology Information (NCBI). <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4593205/>

Aldabe, J. (2011). Caracterización físico-química del material particulado en la Comunidad Foral de Navarra. Tesis doctoral. Universidad de Navarra, Pamplona, España. 217p.

Arenas Pacheco, J. (2017). Determinación del material particulado PM₁₀ y PM_{2.5}, dióxido de azufre y dióxido de nitrógeno en el distrito de Yura – Arequipa, Perú. Tesis de pregrado. Universidad Nacional de San Agustín.

Ayala, K., & Beteta, V. (2016). Niveles de dióxido de nitrógeno generados por el flujo vehicular en la zona urbana de Tingo María. Revista de Investigación Ambiental (RevIA), 6(1), 12–18. <https://revistas.unas.edu.pe/index.php/revia/article/view/44>

Baranyai, E. (2014). The effect of a fireworks event on the amount and elemental concentration of deposited dust collected in the city of Debrecen, Hungary. Environmental Monitoring and Assessment.

Bastos, D., et al. (2022). Medición y monitoreo de material particulado en obras de construcción: directrices para el enfoque gravimétrico. Sustainability, 14(1), 558. Universidad Federal de Bahía, Brasil. <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/1/558>

Beamer, P. I., et al. (2014). Use of dust fall filters as passive samplers for metals. Environmental Science: Processes & Impacts, 16, 204–213. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4038653/>

Carranza, J., et al. (2021). Proyecto de investigación para la fiscalización ambiental: La incorporación del material particulado sedimentable como parámetro en el ECA Aire para la evaluación ambiental. Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA), Perú. <https://repositorio.oefa.gob.pe/server/api/core/bitstreams/02ce3667-279d-4557-b91a-c4ae84a2cd48/content>

Cho, S., Lee, G., Park, D., & Kim, M. (2021). Study on resuspension characteristics of particulate matter in a school classroom using chamber experiments: Influence of humidity. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(6), 2856. <https://doi.org/10.3390/ijerph18062856>

Cortez, E. (2019). Determinación de partículas sólidas totales (PST) mediante el método gravimétrico en la atmósfera de la carretera del tramo Celendín – José Gálvez. Tesis de pregrado. Universidad Nacional de Cajamarca, Perú. <https://repositorio.unc.edu.pe/bitstream/handle/20.500.14074/3469>

Davila Romero, S. A. (2022). Evaluación espacial de concentraciones de polvo atmosférico sedimentable (PAS) y propuesta de una alternativa de purificación en la urbanización La Libertad – distrito de Comas, 2021. Tesis de pregrado. Universidad Privada del Norte, Perú. <https://repositorio.upn.edu.pe/backend/api/core/bitstreams/7cd37667-ab0e-4d35-93ee-78c6e4b5d856/content>

Gonzales Rojas, J. (2022). Evaluación del grado de contaminación del aire por partículas en suspensión en la ciudad de Iquitos, Loreto, 2021. Tesis universitaria.

Ibazeta Gamarra, C. A. (2019). Comparación de los métodos Bergerhoff y placas receptoras para la determinación de polvo atmosférico sedimentable en el distrito de Miraflores (2016–2017). Tesis de pregrado. Perú.

Isaifan, R. J., Johnson, D., Ackermann, L., Figgis, B., & Ayoub, M. (2020). Evaluation of adhesion forces between dust particles and photovoltaic module surfaces. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0927024818305567>

Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI). (2024). Compendio estadístico Huánuco 2023. Perú. <https://www.gob.pe/institucion/inei/informes-publicaciones>

Lara Bardales, J. A. (2025). Diseño de investigación para la propuesta del tipo de plástico óptimo para la elaboración de cajas de Petri en una empresa productora de plásticos, ubicada en Mixco, Guatemala. Universidad de San Carlos de Guatemala. <https://biblio.ingenieria.usac.edu.gt/protocolos/2025/TGP1902.pdf>

Livia Calixto, K. X. (2020). Contaminación del aire por partículas atmosféricas sedimentables en el ambiente interior de la zona urbana de Tingo María. Tesis de pregrado. Universidad Nacional Agraria de la Selva. <https://repositorio.unas.edu.pe>

Livia Calixto, K. X., Reátegui Inga, M. E., Aguirre, C., Cabrejos Barriga, J. E., & Reátegui, R. (2021). Contaminación del aire por partículas sedimentables en domicilios en la zona urbana de la provincia de Leoncio Prado, departamento de Huánuco. *Revista Científica Pakamuros*, 9(4), 41–53. <https://revistas.unj.edu.pe/index.php/pakamuros/article/view/153>

Macedo Silva, C. A., & Pérez Mejía, D. G. (2023). Estudio para la determinación del polvo atmosférico sedimentable en tres avenidas de la ciudad de Iquitos – 2022. *Universidad Científica del Perú*. <https://repositorio.ucp.edu.pe>

Popoola, A. O., et al. (2023). Dispersion of PM and VOC pollutants from open burning of municipal solid waste in host communities. *Environmental Science: Advances*. <https://pubs.rsc.org>

Rodrigo, C., Alexis, T., Carlos, M., & Andi, L. (2022). Impactos del material particulado (PM_{2.5}) en la calidad atmosférica del distrito de Morales – provincia de San Martín. *Universidad César Vallejo, Tarapoto, Perú*.

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). (2023). Boletín hidroclimático Huánuco: enero–abril 2023. <https://www.gob.pe/institucion/senamhi/informes-publicaciones/4516186-boletin-hidroclimatico-huanuco-enero-abril-2023>

Sánchez Carbajal, G. A. (2022). Concentración del polvo atmosférico sedimentable en áreas internas de seis municipalidades distritales de la provincia de Leoncio Prado, periodo mayo–octubre 2022. Tesis de pregrado. *Universidad Nacional Agraria de la Selva*. <https://repositorio.unas.edu.pe>

Yilbas, B. S., Yousaf, M. R., Al-Sharafi, A., Ali, H., Al-Sulaiman, F., Abu-Dheir, N., Khaled, M., & Al-Aqeeli, N. (2017). Modified glass surface with nano-silica impregnated with silicone oil and influence of environmental dust particles on optical transmittance. *RSC Advances*.

Yuan, X., Zhang, Y., Li, M., Wang, H., & Chen, J. (2023). Effects of temperature and relative humidity on the deposition characteristics of airborne particles under controlled environmental conditions. *Environmental Science and Pollution Research*

Zevallos García, L. (2022). Presencia de materia sedimentable del aire en la ciudad de Tingo María y zonas periféricas, meses de octubre–marzo. Tesis de pregrado. *Universidad Nacional Agraria de la Selva*. <https://repositorio.unas.edu.pe>



Figura 15. Instalacion de placas receptoras en el P2



Figura 16. Recojo de Muestra de placas receptoras en el P2

MES Y AÑO: 07 de Noviembre 12 de Diciembre DATOS MATERIAL PARTICULADO

PUNTO 1	Inicio		Final	
	Inicio	Final	Inicio	Final
PSV1	6,2466	6,2929	6,4932	6,4524
PSV2	7,0055	7,0010	6,5128	6,5302
PSV3	6,1810	6,2313	6,4470	6,5395
PCV1	10,4100	10,4350	10,2030	10,2292
PCV2	14,4580	14,1540	10,4410	10,4165
PCV3	11,5287	11,5530	10,8110	10,8180
PCS1	7,2156	7,2250	6,8391	6,8330
PCS2	7,1970	7,1841	6,8366	6,8376
PCS3	7,1180	7,1205	6,6425	6,6765

MES Y AÑO: 12 de Noviembre 12 de Diciembre

PUNTO 1	Inicio		Final	
	Inicio	Final	Inicio	Final
PSV1	6,4433	6,3991	6,4452	6,4568
PSV2	7,4054	7,3989	6,5143	6,5257
PSV3	6,3304	6,3823	6,4513	6,4622
PCV1	10,6066	10,6205	10,5209	10,5366
PCV2	11,6136	11,6410	11,5457	11,5533
PCV3	11,3688	11,3150	9,4995	9,4950
PCS1	7,1315	7,1354	6,8364	6,8329
PCS2	7,0566	7,0582	6,8493	6,8487
PCS3	7,1222	7,1130	6,6091	6,6225

MES Y AÑO: 07 de Noviembre 12 de Diciembre

PUNTO 1	Inicio		Final	
	Inicio	Final	Inicio	Final
PSV1	35,3529	35,3338	36,0397	36,1652
PSV2	37,6675	37,6675	36,6296	36,6774
PSV3	21,1314	21,6314	23,0287	23,6410
PCV1	42,3092	42,4800	42,0891	42,8177
PCV2	46,0752	46,0766	42,0020	42,6378
PCV3	40,8310	40,8320	43,0926	43,0982
PCS1	34,3267	34,3435	34,8977	34,8719
PCS2	35,8934	35,8268	33,9074	33,9509
PCS3	35,0901	35,0772	36,2029	36,2322

Figura 17. Registro de concentración de partículas atmosférica sedimentable

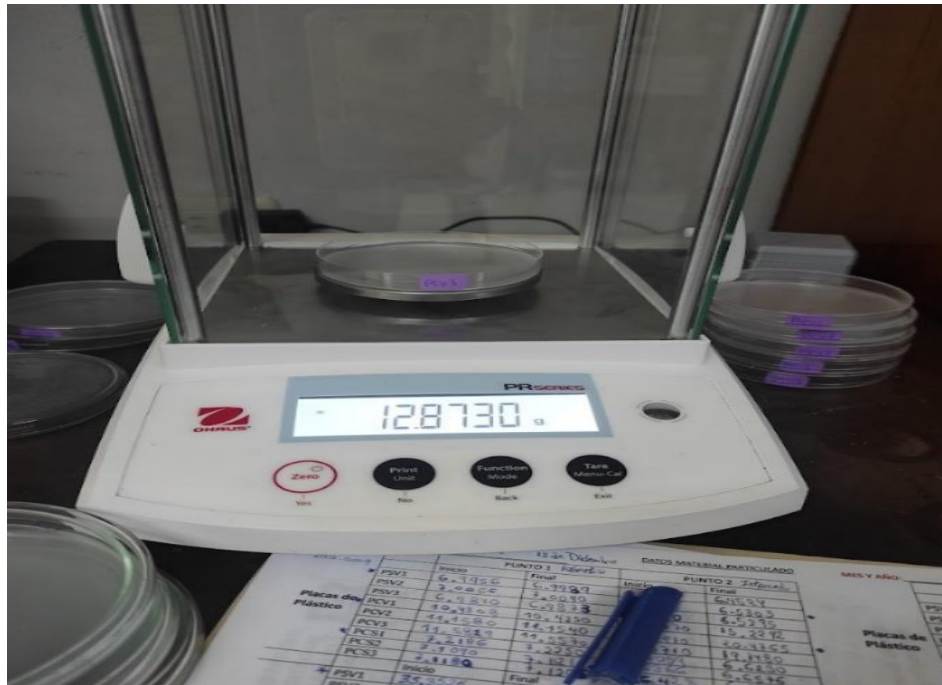


Figura 18. Pesado de concentración de partículas atmosférica sedimentable

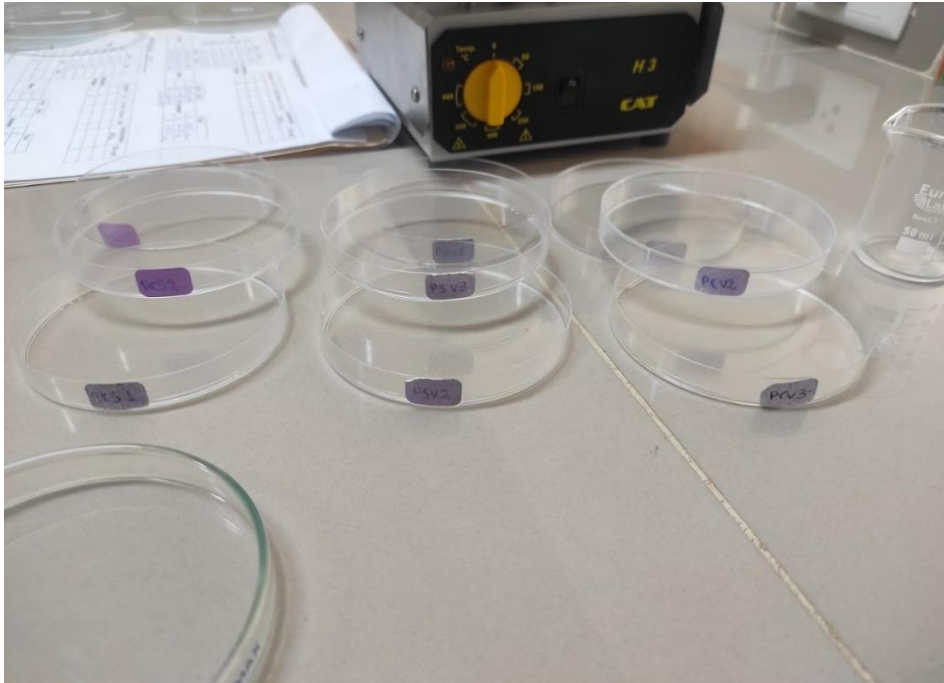


Figura 19. Preparación de placas receptoras Diciembre 2023



Figura 20. Concentración de placas receptoras con partículas atmosféricas sedimentable

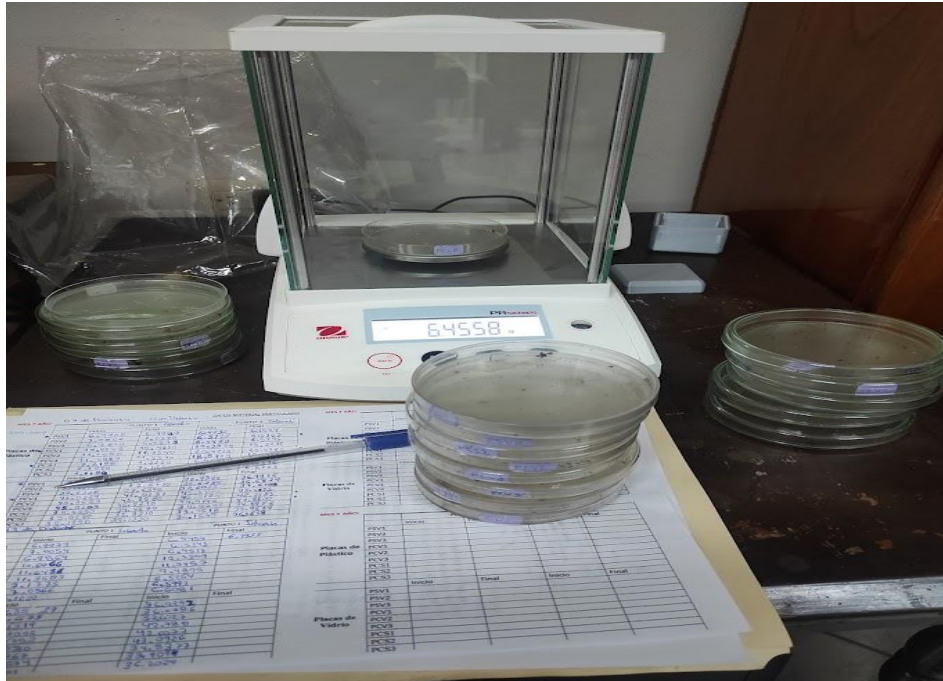


Figura 21. Pesado de placas receptoras Diciembre 2023 P1



Figura 22. Registro de concentración de partículas atmosférica sedimentable diciembre 2023



Figura 23. Pesado de placas PSV 3



Figura 24. Pesado de placas receptoras Diciembre 2023 P2



Figura 25. Instalacion de Placas receptoras P2 Noviembre 2023



Figura 26. Instalacion de Placas receptoras P2 Diciembre 2023



Figura 27. Instalacion de placas receptoras P1



Figura 28. Instalacion de placas receptoras P1



Figura 29. Preparación de las placas receptoras PSV, PCV y PCS

MES Y AÑO:		DATOS MATERIAL PARTICULADO				MES Y AÑO:
		PUNTO 1		PUNTO 2		
		Inicio	Final	Inicio	Final	
100.000g Placas de Plástico	PSV1	6.1956		6.4432		
	PSV2	7.0206		6.5128		
	PSV3	6.9840		6.4470		
	PCV1	10.4308		15.2970		
	PCV2	11.4580		32.4910		
	PCV3	11.5219		18.8710		
	PCS1	7.2186		6.0094		
	PCS2	7.7070		6.8366		
	PCS3	7.1180		60.428		
Placas de Vidrio	PSV1	35.3526		36.9395		
	PSV2	37.6660		36.6785		
	PSV3	37.6306		37.6023		
	PCV1	41.0329		45.3440		
	PCV2	45.3623		46.3180		
	PCV3	45.0203		44.9198		
	PCS1	34.4230		34.9285		
	PCS2	33.8270		33.9618		
	PCS3	35.1290		36.1595		
MES Y AÑO:		PUNTO 1		PUNTO 2		MES Y AÑO:
		Inicio	Final	Inicio	Final	
Placas de Plástico	PSV1					
	PSV2					
	PSV3					
	PCV1					
	PCV2					
	PCV3					
	PCS1					
	PCS2					
	PCS3					
Placas de Vidrio	PSV1					
	PSV2					
	PSV3					
	PCV1					
	PCV2					
	PCV3					
	PCS1					
	PCS2					
	PCS3					

Figura 30. Registro de Pesos Iniciales del mes de Noviembre 2023



Figura 31. Instalación del Soporte de placas receptoras



Figura 32. Pesado de PCS Enero 2024



Figura 35. Placa receptora de vidrio con vaselina 2



Figura 36. Placa de vidrio cubierta con vaselina



Figura 37. Placa de plástico recubierta con silicona en spray

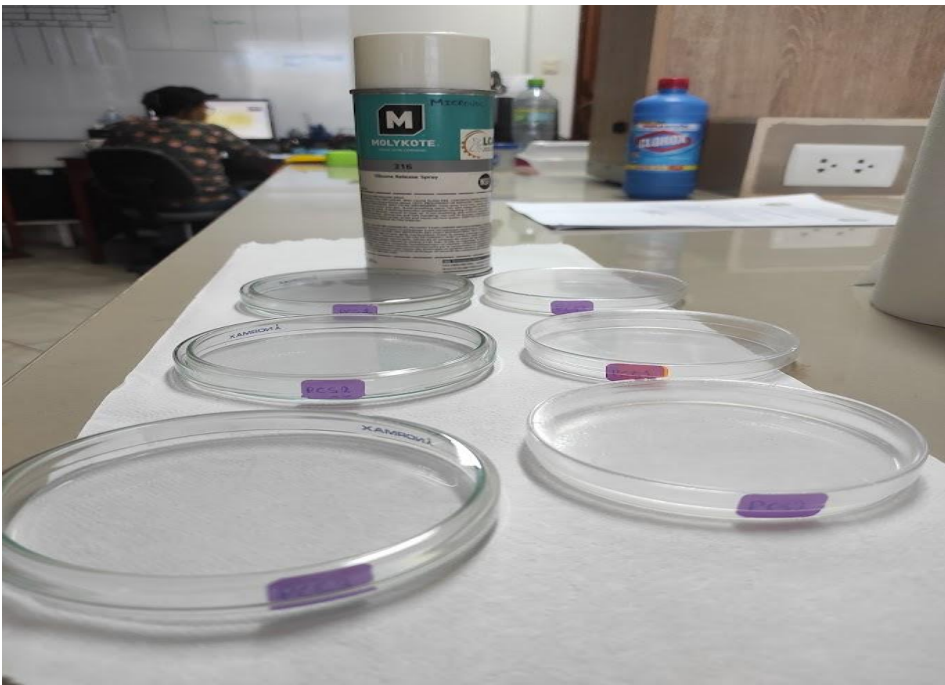


Figura 38. Preparación de placas receptoras con spray



Figura 39. Preparación de tipos de placas y tipos de adherentes



Figura 40. Preparación del punto P2



Figura 41. Armado del Soporte de placas receptoras



Figura 42. Construcción de soporte de placas receptoras



Figura 43. Medición de coordenadas UTM



Figura 44. Medición de coordenadas UTM con el GPS

PUNTO 1	LABORATORIO (NOVIEMBRE 2023)								
	PSV1	PSV2	PSV3	PCV1	PCV2	PCV3	PCS1	PCS2	PCS3
peso placa sola (g)	6.9956	7.0066	6.984	10.4308	11.1539	11.5461	7.2186	7.109	7.118
peso de placa con partículas (g)	6.9989	7.0099	6.9873	10.435	11.1582	11.5507	7.2284	7.1252	7.1279
peso de partículas (g)	0.0033	0.0033	0.0033	0.0042	0.0043	0.0046	0.0098	0.0162	0.0099
diámetro de placa (m)	0.093	0.093	0.093	0.093	0.093	0.093	0.093	0.093	0.093
Radio (m)	0.0465	0.0465	0.0465	0.0465	0.0465	0.0465	0.0465	0.0465	0.0465
area de la placa (m ²)	0.0068	0.0068	0.0068	0.0068	0.0068	0.0068	0.0068	0.0068	0.0068
PAS (g/m ²)	0.4858	0.4858	0.4858	0.6183	0.6330	0.6772	1.4427	2.3848	1.4574
PAS (mg/cm ²)	0.0486	0.0486	0.0486	0.0618	0.0633	0.0677	0.1443	0.2385	0.1457
PAS promedio (mg/cm ² /mes)	0.0486			0.0643			0.1762		

Figura 45. Concentración de partículas atmosférica sedimentable noviembre 2023

PUNTO 1	LABORATORIO (NOVIEMBRE 2023)								
	PSV1	PSV2	PSV3	PCV1	PCV2	PCV3	PCS1	PCS2	PCS3
peso placa sola (g)	35.3526	37.666	37.6306	41.0129	45.3523	45.8603	34.423	35.8271	35.1291
peso de placa con partículas (g)	35.3565	37.6711	37.634	41.0287	45.3681	45.877	34.4353	35.8498	35.1398
peso de partículas (g)	0.0039	0.0051	0.0034	0.0158	0.0158	0.0167	0.0123	0.0227	0.0107
diámetro de placa (m)	0.093	0.093	0.093	0.093	0.093	0.093	0.093	0.093	0.093
Radio (m)	0.0465	0.0465	0.0465	0.0465	0.0465	0.0465	0.0465	0.0465	0.0465
area de la placa (m ²)	0.006792909	0.006792909	0.006792909	0.006792909	0.006792909	0.006792909	0.006792909	0.006792909	0.006792909
PAS (g/m ²)	0.574128133	0.750782943	0.500521962	2.325955001	2.325955001	2.458446109	1.810711805	3.34172016	1.575172058
PAS (mg/cm ²)	0.057412813	0.075078294	0.050052196	0.2325955	0.2325955	0.245844611	0.18107118	0.334172016	0.157517206
PAS promedio (mg/cm ² /mes)	0.060847768			0.23701187			0.224253467		

Figura 46. Concentración de partículas atmosférica sedimentable noviembre 2023