

Evaluación de la contaminación del aire por microplásticos suspendidos en la zona de La Maica (Cochabamba, Bolivia)

Evaluation of air pollution by suspended microplastics in the La Maica area (Cochabamba, Bolivia)

Valeria Oporto Tapia, Iván Escóbar, Marcos Luján y Paul d'Abzac

Centro de Investigación en Ciencias Exactas e Ingeniería, Departamento de Ciencias Exactas e Ingeniería, Universidad Católica Boliviana San Pablo, Sede Cochabamba, c. Márquez s/n, Zona Tupuraya, Cochabamba - Bolivia

valeria.oporto@ucb.edu.bo

Resumen: Los microplásticos (MPs) pueden encontrarse de forma suspendida en el aire, formando así parte del material particulado y causando problemas en la salud de personas, animales y contaminación en el medio ambiente a nivel mundial. Cochabamba es una de las ciudades más afectadas por contaminación atmosférica en Latinoamérica y al no contar con estudios respecto a MPs en el aire, se hace necesario iniciar estudios para valorar la presencia de MPs suspendidos en el aire, como objetivo central de este estudio. Para ello, se seleccionó la zona Sur - La Maica y un punto de control en la zona Norte - Tupuraya como puntos de muestreo, adaptando un protocolo adecuado para el muestreo, análisis y conteo de MPs. Posteriormente, se analizó la variación espacial de los microplásticos, observando los niveles de contaminación encontrados en los puntos de muestreo, así como también se comparó, su presencia en relación al material particulado (PM_{10}). Finalmente se determinó las concentraciones de MPs suspendidos en el aire mostrando una mayor concentración de 4.691 MPs/m^3 en la zona Norte - Tupuraya, en comparación de las concentraciones de MPs 3.027 MPs/m^3 y 3.876 MPs/m^3 en la zona Sur - La Maica, pero menores concentraciones de PM_{10} .

Palabras clave: Plásticos, Microplásticos, Material Particulado, Contaminación del aire, La Maica, Tupuraya.

Abstract: Microplastics (MPs) can be found suspended in the air, thus forming part of particulate matter and causing health problems for people, animals and environmental pollution worldwide. Cochabamba is one of the cities most affected by air pollution in Latin America and as there are no studies regarding MPs in the air, it is necessary to start studies to evaluate the presence of MPs suspended in the air, as the main objective of this study. For this, in the South - La Maica and a control point in the North - Tupuraya as sampling points were selected, adapting an adequate protocol for the testing, analysis and counting of MPs. Subsequently, the spatial variation of microplastics was analyzed, observing the levels of contamination found at the sampling points, as well as comparing their presence in

relation to particulate matter (PM₁₀). Finally, it was determined that the concentrations of MPs suspended in the air show a higher concentration of 4,691 MPs/m³ in the North zone – Tupuraya, compared to the concentrations of MPs 3,027 MPs/m³ and 3,876 MPs/m³ in the South zone – La Maica, but lower concentrations of PM₁₀.

Key words: Plastics, Microplastics, Particulate Matter, Air Pollution, La Maica, Tupuraya.

1 Introducción

El plástico se ha convertido en el material más utilizado en el último siglo, como consecuencia ocasionó una producción masiva y un problema creciente de contaminación a través de los años, que amenaza el suelo, agua, aire y la salud de animales y humanos (Barrientos, 2019). El plástico puede tardar en descomponerse entre 150 y 1.000 años, tiempo en el cual puede provocar múltiples daños en los ecosistemas y en la salud de las personas (Sánchez, 2019), se han convertido en residuos que se acumulan a un ritmo incontrolado en diferentes ecosistemas; degradándose en piezas muy pequeñas de tamaños inferiores a 5 mm denominados microplásticos (MPs) (Castañeta *et al.*, 2020).

En los últimos años, el estudio sobre MPs despertó el interés en diferentes investigadores y científicos a nivel mundial, debido al efecto que estos tienen sobre el medio ambiente y la salud de las personas (Leahy, 2020). Sin embargo, una revisión que realizó la Universidad Mayor de San Andrés (UMSA) sobre MPs en la atmósfera en los últimos años; indica que no se cuenta con investigaciones sobre MPs suspendidos en el aire, a nivel de suelo y agua, en Bolivia. Los estudios son muy escasos; sin embargo, se tiene la información de que estos MPs se encontraron en el aire de áreas urbanas, suburbanas, e incluso en zonas remotas, en investigaciones de otros países (Castañeta *et al.*, 2020).

A pesar de esto, la falta de armonización en la comunidad científica, tanto en la manera de clasificar los diferentes tipos de plástico como en la manera de determinar las mejores metodologías existentes para su análisis en los distintos ecosistemas contaminados, llegan a ser las principales limitaciones en las investigaciones sobre contaminación por plásticos; especialmente en el aire. Sin embargo, se han desarrollado definiciones formales para una mejor armonización en cuanto a las distintas investigaciones que existen sobre la contaminación de plásticos en la actualidad (Celaya, 2020).

Por esto se propone un estudio exploratorio de los contaminantes suspendidos en el aire en la zona de La Maica en Cochabamba – Bolivia, siendo información necesaria y aprovechable para futuras políticas nacionales o reglamentos específicos que mencionen un seguimiento de estas partículas consideradas como contaminantes atmosféricos. Las principales formas de generación o emisión de MPs en la ciudad de Cochabamba se deben a la dispersión de residuos sólidos plásticos, debido a que, en Bolivia, la gestión de los residuos sólidos (RS) es muy deficiente, además del incremento de basura plástica a causa de la pandemia del COVID-19, lo cual conlleva

a la dispersión de MPs y una posible contaminación del aire por los mismos (Sturzenegger, 2021).

Otro factor importante a tomar en cuenta son las características topográficas y climatológicas del Valle Central en el que se encuentra la ciudad de Cochabamba, el cual no proporciona una buena ventilación del aire debido a las frecuentes inversiones térmicas, sobre todo en invierno, dando lugar a una mayor concentración de diferentes contaminantes y posiblemente MPs. A esto se suma el crecimiento del parque automotor, que es la principal fuente de contaminación atmosférica (Laguna *et al.*, 2019; Marcos, 2020; Red MoniCA, 2006; Terán, 2022). Por estas condiciones, Cochabamba es la ciudad más contaminada de Bolivia en cuanto a su calidad de aire, siendo la zona Sur de una de las más afectadas a razón del contaminante PM₁₀ (Material Particulado con diámetros menores a 10 micrómetros), que supera los valores permisibles de la Ley Boliviana y las guías de la OMS, resaltando que los límites permisibles por la OMS para el año 2022 en cuanto al PM₁₀ redujeron de 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para la media anual y de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a 45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para la media en 24h (OMS, 2016, 2021).

Es por esto, que el presente estudio se llevará a cabo en la zona Sur de Cochabamba – Bolivia conocida como La Maica, con una altitud de 2.560 m s.n.m. al sur del Aeropuerto por el Municipio de Santivañez (Viceministerio de Planificación Y Coordinación, 2006). La población de la zona es de aproximadamente 1.420 habitantes, los cuales cuentan con todos los servicios básicos en la zona, sin embargo, presentan continuamente problemas con el mal manejo de residuos y el riego de sus cultivos con aguas contaminadas del Río Rocha, las cuales presentan elevada concentración de metales pesados, 37 tipos de pesticidas e incluso antibióticos, y encontrando en recientes estudios MPs en el agua del Río Rocha (Herbas *et al.*, 2017; Linera, 2021; OPINIÓN, 2020).

Es así que el presente trabajo tiene como objeto evaluar la contaminación del aire por microplásticos suspendidos en la zona de La Maica Cochabamba Bolivia. Se realizó un monitoreo de la presencia de partículas de microplásticos suspendidos menores a 10 micrómetros en la zona y se estudió la variación espacial de los microplásticos suspendidos en el aire.

La investigación se realizó en dos zonas: la zona Sur, conocida como “La Maica” (zona de muestreo) y en la zona Norte - Tupuraya (como zona control) ubicadas en Cochabamba - Bolivia con periodos de muestreo de una semana cada tres meses, con un tiempo de exposición de 24 h por muestra. Este estudio se encuentra dentro la línea de investigación del proyecto “Agua y vida en La Maica” del Centro de Investigación en Ciencias Exactas e Ingenierías de la Universidad Católica Boliviana (CICEI), esta línea de investigación, evalúa el comportamiento y los efectos de los microplásticos en el medio ambiente y así promover la revisión de normativas referentes y su cumplimiento. Además, se podrá replicar la metodología empleada de la presente investigación, en regiones con características similares a la región de Cochabamba.

2 Calidad de aire en Cochabamba

Las emisiones del parque automotor y algunas fuentes puntuales de emisión de contaminantes como la producción de ladrillos artesanales en Cochabamba generan un fuerte deterioro de la calidad del aire en la ciudad de Cochabamba, principalmente por la emisión de material particulado, principal agente contaminante en los últimos 11 años (2010-2021), además de un ineficiente manejo de los RS en la ciudad (Terán, 2022).

De igual manera, sus características de valle cerrado (similar a una hoyada) que presenta Cochabamba, impide una buena circulación del aire, donde el fenómeno de inversión térmica impide que los gases tóxicos y material particulado del ambiente se disipen, por lo que quedan retenidos durante más tiempo en el aire; ocasionando así una mayor contaminación (Calla y Luján, 2018; ENVIRA IOT, 2020; LOS TIEMPOS, 2013; OMS, 2016), siendo la zona Sur la más afectada a razón de los bajos niveles de ventilación que presenta como puede observarse en la Figura 1.

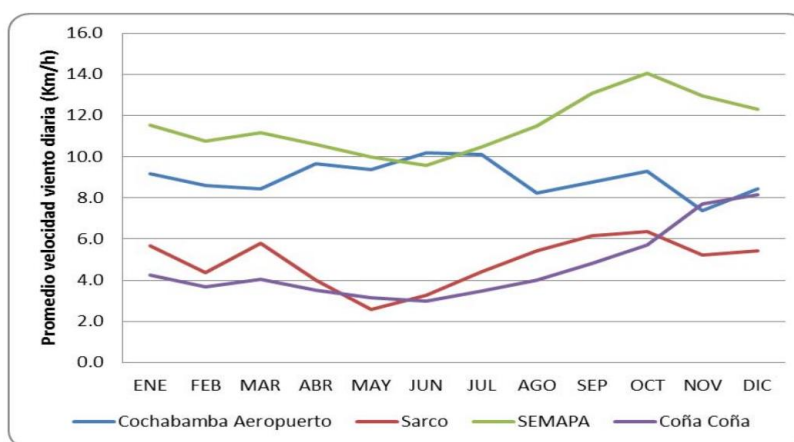


Figura 1. Variación anual de la velocidad promedio mensual de vientos en las diferentes estaciones meteorológicas del Valle Central de Cochabamba.

Fuente: (Montenegro y Luján, 2017) reproducido con permiso de los autores.

La estación de SEMAPA está ubicada en la zona Norte de Cochabamba, presenta una mayor ventilación en comparación con las estaciones Coña Coña, Sarco y la del Aeropuerto; ubicadas en la zona Sur de la ciudad, esta zona presenta una menor ventilación, lo cual dificulta la circulación de los contaminantes (Montenegro y Luján, 2017; Red MoniCA, 2006). Inventarios de emisiones en Cochabamba determinaron que la principal causa contaminación del aire es el tráfico vehicular, hecho que comprobaron en la actividad conocida como el “Día del Peatón y la Bicicleta” debido a que “año tras año, los niveles de contaminación de ese día descienden a valores prácticamente nulos” (Red MoniCA, 2006, p. 45).

El contaminante que más afecta a la salud de la población, por los altos niveles de contaminación y toxicidad asociada, es el PM_{10} , debido a las diversas fuentes de emisión de este tipo de partículas, como ser: la resuspensión de partículas y desgaste de llantas, ocasionadas por el alto tráfico vehicular, sobre todo en la zona Sur de la ciudad, entre otras emisiones de PM ocasionadas por los aviones y emisiones de algunas industrias instaladas en la zona, como las ladrilleras artesanales (INE, 2017; Luján, 2009; Marcos, 2020). Se observa un incremento en las concentraciones de PM_{10} durante el último año (2020 – 2021) en la ciudad de Cochabamba, especialmente en la zona Sur (estación Fuerza Aérea y Parque Kanata) (Terán, 2022).

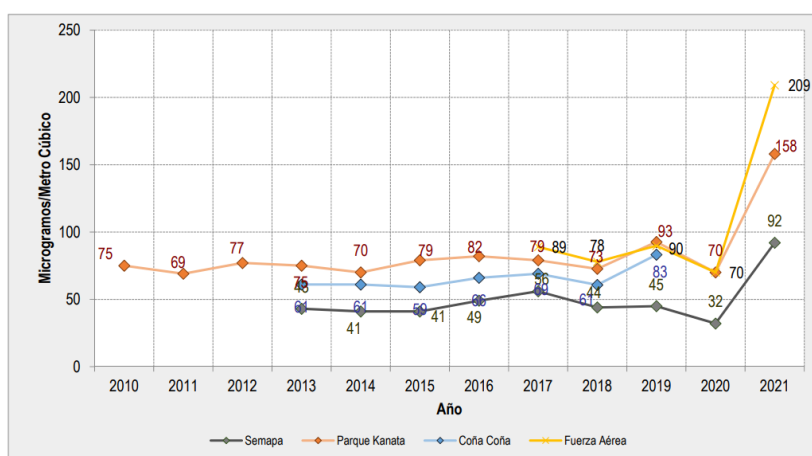


Figura 2. Promedio anual Material Particulado (menor a 10 micras) 2010-2021. Fuente: (Terán, 2022).

2.1 Origen del material particulado PM_{10} y $PM_{2,5}$ por plásticos

El material particulado es uno de los principales contaminantes del aire, cuyas características químicas disminuyen la calidad de aire que respiramos, consistiendo en una mezcla de partículas (sólidas con otras líquidas), “las cuales se encuentran suspendidas en la atmósfera y varían en forma, tamaño y composición, siendo así, mezclas que no están completamente uniformes y por lo tanto su composición química y sus propiedades físicas son muy heterogéneas” (Gonzales y Jiménez, 2020), además de ser partículas finas con capacidad de alcanzar las membranas más internas de los tejidos pulmonares, ocasionando así daños a la salud como irritación en los tejidos respiratorios, fibrosis, asma, entre otras enfermedades como el cáncer (INE, 2017; OMS, 2021).

En el último tiempo el plástico se volvió un material muy común e indispensable, llegando a ser uno de los materiales más producidos por el ser humano, atentando en la actualidad contra el bienestar de la salud pública y del medio ambiente, especialmente al momento de ser desechados. Debido a que este material sintético resiste a la degradación química y física, los desechos de plásticos se están acumulando indiscriminadamente en ecosistemas de todo el planeta y se dispersan a medida que estos se fragmentan progresivamente en pedazos más pequeños, como

el PM₁₀ y PM_{2,5}, encontrándose así en el material particulado; lo cual se ha convertido en una preocupación ambiental generalizada (Castañeta *et al.*, 2020).

Una vez desechados, los plásticos pueden perdurar en el medio ambiente durante cientos e incluso miles de años, esta baja velocidad de degradación que poseen se debe, en parte, a su complejidad, debido a que todos los materiales plásticos están formados por largas cadenas de moléculas, donde dichas cadenas deben pasar por un proceso de ruptura para llevarse a cabo la degradación del material y dar lugar a la formación de partículas más pequeñas conocidas como microplásticos (<5mm) y nanoplasticos (<100µm) encontrándose dentro del material particulado. Todas estas fragmentaciones son producto de la degradación mecánica y química del plástico en todo tipo de procesos de producción, usos y aplicaciones del mismo a través de su ciclo de vida que por la acción de fuerzas mecánicas y químicas como: viento, elevadas temperaturas, lluvia, rayos del sol, ambientes salinos o radiación ultravioleta; desgastan el material plástico, reduciéndolos a fragmentos más pequeños produciendo los MPs (Crawford y Quinn, 2017; García, 2019; Pires, 2019; Valdés, 2020).

Cabe añadir que, un estudio sobre los MPs originados por el desgaste de neumáticos, frenos y otras partes de los vehículos (debido a la abrasión mecánica y corrosión), demostró que también liberan miles de toneladas de microplásticos cada año a la atmósfera. Originándose sobre todo en las regiones más densamente pobladas del mundo y con elevado tráfico vehicular. Donde del total de 97.000 t de MPs de un tamaño de 2,5 micras, procedente del desgaste de los frenos; un 46 % se depositaron en tierra y un 54 % en los océanos y una cantidad considerable (30.000 t), terminó en superficies de nieve y hielo (Marcos, 2020).

Siendo los neumáticos una de las mayores fuentes de microplásticos, debido que incluyen una variedad de polímeros sintéticos y fibras de poliéster, estimando que hasta el 10% del desgaste de los neumáticos pasan a formar parte de la contaminación atmosférica (Hann *et al.*, 2018). Países como Estados Unidos, el norte de Europa y grandes áreas urbanizadas del este de China, Medio Oriente y América Latina, presentan altas densidades de vehículos, y se evidencia una mayor contaminación del aire por MPs suspendidos. Un estudio de dos autopistas muy frecuentadas y una carretera federal alemana, encontró que hasta un 90% de 500 partículas extraídas del aire, provenía de los neumáticos y sistemas de frenos de los vehículos, al igual que las concentraciones encontradas en Indonesia eran mayores en calles más transitadas y con mayor flujo vehicular (Dipareza *et al.*, 2019; Quintero, 2018).

Los microplásticos de 10 micrómetros se depositan principalmente cerca de las regiones de emisión de puntos críticos llegando a estar suspendidos entre 5,5 y 11 días. Sin embargo, los microplásticos de 2,5 micrómetros y de tamaño inferior, se transportan a través del aire mucho más lejos, terminando en lugares lejanos como el océano o el Ártico, llegando a estar suspendidos hasta 37 días; pero con concentraciones más pequeñas a razón de perderse por la deposición seca y húmeda, como las gotas de lluvia, durante el transporte a larga distancia (Marcos, 2020).

Los principales factores que potencian la presencia de MPs en el medio ambiente son: la erosión por medio del agua, viento, o efectos a causa de temperaturas elevadas

y los rayos del sol; los cuales fragmentan con el paso del tiempo dichos plásticos y MPs hasta dividirlos en partículas diminutas y llegar a escalas nanoscópicas, donde el transporte atmosférico, la densidad y la forma de las partículas microscópicas juegan un papel importante en el transporte de los MPs por medio de la lluvia, viento y nieve, llegado a zonas vírgenes, al mar y se los ha encontrado también en el interior de organismos de animales (Valdés, 2020; Zhang *et al.*, 2020).

2.2 Microplásticos y la salud humana

Debido a su lenta descomposición de al menos 150 años o más (dependiendo del tipo de plástico) provoca múltiples daños en los ecosistemas; lo que lo convierte en un producto altamente contaminante, más aún al momento de ser desechado (Pineda, 2020), terminando en el vertedero: donde el 79% del material plástico se entierra, el 12% se incinera y sólo el 9% de este se recicla, y si llega a ser incinerado libera gases tóxicos altamente contaminantes para el aire, agua y muchos de estos llegan a parar a ríos, lagunas o mares ocasionando un daño en la fauna y flora. Sin embargo, existen plásticos que no llegan al sistema de recogida de basura como ser el plástico de un solo uso, el industrial y muchos otros (Pineda, 2020; Valdés, 2020).

Las partículas de microplástico más pequeñas pueden ser ingeridos o aspirados por medio de la respiración, proporcionando una vía potencial para la transferencia de contaminantes pues muchos contaminantes pueden ser adsorbidos en su superficie; mientras más profundo viajen estas partículas el efecto será mayor, por lo que están asociados a posibles riesgos en la salud, según su clasificación (Ver Tabla 1) (Aldunate *et al.*, 2006; Castañeta *et al.*, 2020).

Tabla 1. Polímeros comunes, monómeros, usos y sus posibles riesgos.

Polímero	Monómero	Uso común	Posible riesgo
PS	Poliestireno	Envases desechables	Cancerígeno, neurotóxico, genotóxico
PET	Ácido Tereftálico - etilenglicol	Botellas, empaques de comida, confección de ropa	Acidosis urinaria, eliminación alterada de electrolitos e hipercalciuria
PVC	Cloruro de vinilo	Plástico de vinilo, películas y tuberías de agua, juguetes, aparatos electrodomésticos	Cancerígeno, obstrucción respiratoria
PLA	Ácido poliláctico	Implantes médicos como dermatológicos y cosméticos	Cancerígeno y enfermedades genéticas
PMMA	Metacrilato de metilo	Ventanas, plásticos transparentes	Irritación cutánea y daño endotelial corneal

			producido por contacto directo
UF	Urea formaldehído	Interruptores de electricidad, pantallas de lámpara, recipientes de cosméticos	Dermatitis, prurito, asma
PU	Diol - diisocianato	Fibras elásticas	Intoxicaciones por inhalación de CO y CO_2 y HCN producidos en la descomposición térmica
PP	Propileno	Juguetes, equipos de laboratorio, componentes automotrices, empaque de alimentos, jeringas desechables,	Citotoxicidad a dosis altas, aumento en la liberación de histaminas
PTFE	Tetrafluoretileno	Recubrimiento para sartenes y utensilios antiadherentes	Astenia, Parestesia, cancerígeno, hipotiroidismo, resistencia a la insulina, obesidad

Fuente: (Castañeta *et al.*, 2020; Sánchez, 2019)

Relacionando así estos MPs suspendidos con una variedad de efectos en la salud, a corto y largo plazo, como ser el caso de infecciones respiratorias, enfermedades cardiovasculares y cáncer de pulmón; debido a que, el 40% de los accidentes cerebrovasculares y el 40% de las cardiopatías isquémicas, el 11% de neumopatía obstructiva crónica y el 6% de las muertes por cáncer de pulmón son atribuibles a la contaminación atmosférica, donde los grupos más vulnerables son los niños, ancianos, mujeres embarazadas y personas con infecciones respiratorias/cardiovasculares, donde a mayor tiempo de exposición al PM, su cuadro de salud tiende a ser más crítico (Laguna *et al.*, 2019; OMS, 2014; Terán, 2022).

A pesar de la evidencia científica que ha permitido cuantificar partículas de micro y nanoplásticas en diferentes entornos, organismos y productos destinados al consumo humano, aún no se disponen de suficientes estudios que demuestren la peligrosidad de estas partículas en salud humana. Sin embargo, en situaciones ocupacionales donde los trabajadores se exponen a concentraciones elevadas de MPs, existe mayor evidencia (Delgado, 2019).

Estudios han demostrado que trabajadores expuestos a fibras y partículas plásticas en el aire, generan disnea, así por ejemplo trabajadores de fábricas de productos textiles sintéticos, donde se observó una mayor incidencia de cáncer después de 10 a 20 años de trabajo/exposición y el riesgo está asociado con la intensidad, la duración y el tiempo transcurrido desde que comienza la exposición o el trabajo, afectando de igual manera a empacadores de PVC expuestos a altos niveles de partículas respirables en el lugar de trabajo, donde el cáncer de pulmón aumentó

en un 20% por cada año adicional de trabajo, detectando fibras de plástico en el 87% de las biopsias de pulmón las cuales podrían ser las responsables de estas enfermedades (Delgado, 2019; Fonnegra, 2019; Mastrangelo *et al.*, 2003).

Sin embargo, la evidencia científica referida a la población humana y a su vulnerabilidad frente a los MPs es aún escasa, haciéndose necesarios más estudios enfocados a investigar como principal objetivo los efectos adversos en la salud humana por otras vías de exposición, como la comida, el agua y el aire (Delgado, 2019).

3 Métodos para el análisis de microplásticos en muestras de aire

Para el análisis de los MPs en el aire se tienen diferentes técnicas de muestreo y caracterización. Para realizar el muestreo de estos se tienen dos métodos, uno pasivo y otro activo. En el método pasivo se disponen filtros en una superficie plana en la que se depositan los MPs debido a su tamaño y por acción de la gravedad. En cambio, en el método activo el aire es forzado (por medio de una bomba), a circular a través de un filtro en el cual las partículas totales de MPs son captadas (Carrales, 2019; INE, 2017).

Los filtros para la toma de muestras pueden ser de cuarzo o vidrio, siendo estos últimos los más óptimos para el estudio, debido a su pureza y resistencia, además de los filtros de nitrocelulosa cuadrículados para una buena filtración y conteo de las partículas de MPs (CESEL, 2013; Prata *et al.*, 2020; SARTORIUS, 2021).

Los MPs con un tamaño pequeño (menor a 100 micras) son los de mayor interés dado que estos se encuentran suspendidos en el aire por un mayor tiempo y además estos se pueden encontrar en la fracción respirable (menor a 10 micras) los cuales pueden suponer un mayor impacto en la salud de las personas (Delgado, 2019; Fonnegra, 2019). Por esto, los equipos a emplear para el muestreo de MPs suspendidos en el aire, y del material particulado, cuentan con impactadores que retienen las partículas de mayor tamaño y solo dejan pasar aquellas para las que el equipo fue diseñado hacia el filtro (Carrales, 2019). De esta manera se puede determinar diferentes fracciones de material particulado suspendido en el aire como PM₁₀ o PM_{2.5}.

Es necesario eliminar cualquier tipo de contaminación que pueda tener el filtro antes de su exposición, para esto el filtro es sometido a temperaturas elevadas, generalmente a 475 °C, para eliminar partículas que puedan estar en este y evitar la contaminación de las muestras (CESEL, 2013; Prata *et al.*, 2020).

Después del muestreo, el filtro tiene que ser tratado, este puede ser lavado o digerido directamente, sin embargo, la digestión directa del filtro puede liberar materia del mismo (fibras) que puede dificultar el posterior análisis de los MPs. Además, cuando se realiza el muestreo se llega a capturar diferentes tipos de partículas, como orgánicas y minerales que también dificultan la caracterización de los MPs, es por esto que se requiere un tratamiento de la muestra en el filtro para análisis de los MPs. Para esto, se realiza una digestión del material captado en el filtro que elimina las partículas que no son MPs, después de la digestión se realiza una

separación por densidad para identificar los MPs de interés y para separar aquellas partículas que no se hayan digerido. Ambos métodos (digestión y separación de partículas) son de importancia para facilitar la identificación y cuantificación de los MPs en el aire, especialmente si la técnica a emplear para esto es un conteo visual (Toledo, 2019; Zhang *et al.*, 2020).

3.1 Digestión de materia orgánica particulada

La digestión consiste en la descomposición de los residuos (materia orgánica y minerales), los cuales no son de interés para el estudio e interfieren en la caracterización e identificación y conteo de los MPs capturados que se pretende analizar (Zhang *et al.*, 2020).

La elección del reactivo utilizado es crucial y debe optimizarse en cada situación, no obstante, en ocasiones los reactivos presentan problemas de degradación de los plásticos hallados en la muestra, o la reducción del peso de las partículas, ya que algunos materiales pueden llegar a fragmentarse o agruparse durante la extracción, lo que puede causar errores a la hora de reportar los resultados (Toledo, 2019). Entre las soluciones de digestión más empleadas se tienen el KOH, NaOH, HNO₃, HClO₄ o el H₂O₂ a diferentes concentraciones (con mayor eficiencia en la investigación de MPs en general) (Toledo, 2019; Zhang *et al.*, 2020). Siendo el H₂O₂ a 100 volúmenes de concentración el más adecuado y empleado en este tipo de estudios.

3.2 Separación por densidad

Es un paso importante para reducir el contenido de materia inorgánica y orgánica de una muestra, se realiza después de la digestión en donde el ciclo de separación de densidad debe repetirse las veces que sean necesarias hasta ya no encontrarse el material que no sea MPs, de modo que el material plástico quede suspendido debido a las densidades que posee y otras partículas como la materia orgánica y minerales al ser más densas precipiten, separando de esta manera los residuos orgánicos y recuperando de manera más eficiente los MPs (Enders *et al.*, 2020). Para ello, existen diferentes métodos en los que se emplean distintos reactivos como el NaCl, el KI o el ZnCl₂ (para muestras atmosféricas) a diferentes concentraciones (Zhang *et al.*, 2020). Siendo este último el más empleado en estos estudios para llegar a una densidad de 1,37 g/cm³ en solución, la cual permite la separación de casi todos los polímeros de MPs (Ver Tabla 2).

Tabla 2. Densidades de los polímeros

Abreviación	Polímero	Densidad (g.cm ⁻³)
PS	Poliestireno (expandido)	0,01 – 1,06
PP	Polipropileno	0,85 – 0,92
LDPE	Polietileno de baja densidad	0,89 – 0,93
EVA	Etileno acetato de vinilo	0,93 – 0,95

HPDE	Polietileno de alta densidad	0,94 – 0,98
PA	Poliamida	1,12 – 1,15
PA 6,6	Nylon 6,6	1,13 – 1,15
PMMA	Polimetacrilato de metilo	1,16 – 1,20
PC	Policarbonato	1,20 – 1,22
PU	Poliuretano	1,20 – 1,26
PET	Tereftalato de polietileno	1,38 – 1,41
PVC	Cloruro de polivinilo	1,38 – 1,41
PTFE	Politetrafluoroetileno	2,10 – 2,30

Fuente: (Frias *et al.*, 2018)

3.3 Técnicas de identificación de partículas microplásticas

Existen diferentes técnicas para la identificación y caracterización de los MPs, entre estos se tienen los siguientes:

Pirólisis acoplada a la cromatografía de gases y espectrometría de masas (pirólisis-GC/MS) es uno de los métodos no visuales para determinar MPs en una muestra según Zhang *et al.* (2020). Sin embargo García (2019), nos indica que existen dificultades para discernir el riesgo de los MPs debido a la escasez de datos comparables y su fiabilidad, es destructivo y el análisis requiere de personal experto y es costoso (Arango *et al.*, 2015; Campanale *et al.*, 2020; Celaya, 2020).

Espectrometría en el infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR) se emplea para identificar un compuesto o investigar su composición especialmente los grupos orgánicos, recoge las vibraciones características de los diferentes grupos de átomos, por lo que depende de la estructura de los compuestos a analizar (Celaya, 2020; García, 2019). Sin embargo, el análisis requiere de personal experto, mucho tiempo de análisis y es una técnica costosa (Arango *et al.*, 2015; Campanale *et al.*, 2020).

Microespectroscopia Raman (μ -Raman) es una de las técnicas más usada, la cual permite la caracterización de MPs mayores a 1 micra y menores a 20 micras, pero se ve limitada por la duración de la medición e interferencia por fluorescencia, dependiente de las características del material como de su color y su degradación (Celaya, 2020; García, 2019). Sin embargo, el análisis requiere de personal experto, mucho más tiempo de análisis que el FTIR y es una técnica costosa (Arango *et al.*, 2015; Campanale *et al.*, 2020).

Clasificación visual es una técnica económica, pudiendo llevarse a cabo con un mínimo de equipamiento y personal no altamente cualificado, aunque la correcta discriminación de partículas muy pequeñas dependerá de la experiencia del analista, utilizando el color, la forma, el tamaño (Zhang *et al.*, 2020). Los MPs más comunes encontrados en la clasificación visual, cuya densidad es compatible con metodologías de laboratorio para su muestreo son: el polietileno (densidad entre 0,91 y 0,97 g/ml), polipropileno (0,94 g/ml), y poliestireno (1,05 g/ml) (Alvarez, 2020).

3.4 Criterios para la identificación y conteo visual de microplásticos

En general, las partículas de plástico mayores se identifican visualmente por su forma (esferas, perlas, gránulos, espuma, fibras mayormente de la industria textil, fragmentos, películas y escamas) para un tamaño entre 5 mm y 1 μm y en cuanto al color, los más encontrados son rojo, naranja, amarillo, marrón, tostado, blanco hueso, blanco, gris, azul, verde, etc. Siendo las más comúnmente reportadas las fibras azules y rojas, y las partículas oscuras, blancas, transparentes o translúcidas pueden estar subrepresentadas durante la inspección visual (Acosta, 2014; Enders *et al.*, 2020; Rosado *et al.*, 2018; Zhang *et al.*, 2020).

Logrando identificar de esta manera los MPs bajo un microscopio óptico (Enders *et al.*, 2020; Martínez, 2019; Zhang *et al.*, 2020), mediante este método las partículas pueden categorizarse en fragmentos, fibras y películas, según Toledo (2019), describiendo la caracterización física por formas, tamaño y colores y posteriormente realizar el conteo y cálculo de las concentraciones de MPs utilizando la siguiente fórmula de Cesel (2013).

$$C = \frac{\text{número de partículas recolectadas}}{\text{volumen de aire muestreado}} \text{ (N}^\circ\text{partículas/m}^3\text{)} \quad (1)$$

Donde:

C: concentración de MPs en número de partículas recolectadas por m^3 en la fracción de PM_{10} recolectada.

4 Metodología

El análisis de MPs en el aire se realizó en la fracción de PM_{10} recolectada por un sistema de separación por impactación. La medición del PM_{10} se realizó por el método gravimétrico, de acuerdo a lo descrito en la Norma Boliviana NB 62014:2018, se empleó un equipo MiniVol TM TAS (IBNORCA, 2018).

Se realizó un ajuste del método por medio de la revisión de diferentes protocolos y técnicas encontradas para el muestreo, análisis y cuantificación de MPs suspendidos en el aire, adaptando el protocolo de Prata *et al.* (2020) para el presente estudio. A continuación, se describirán los pasos a seguir para las tres etapas de la investigación, resumiendo los procesos de cada una en la Figura 3.

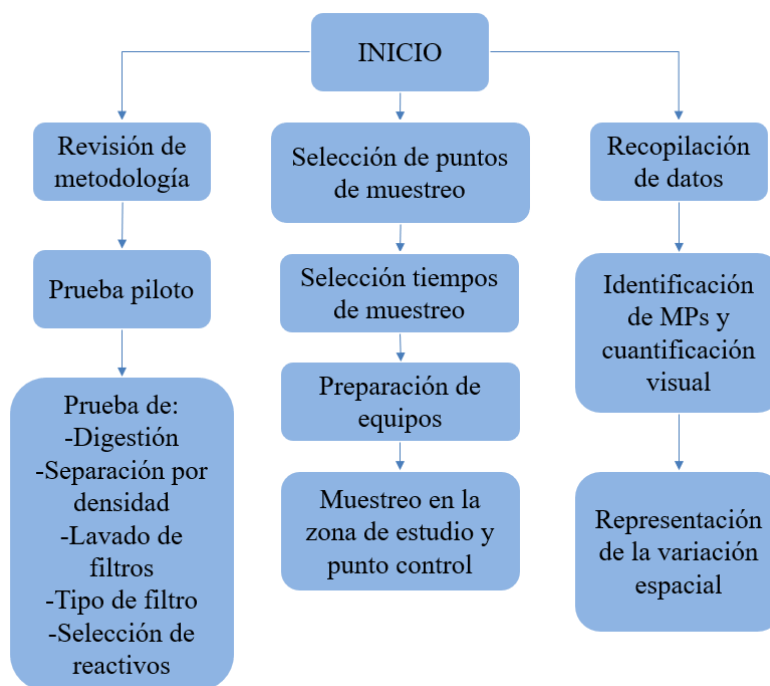


Figura 3. Flujograma resumen del procedimiento

4.1 Selección de los puntos de muestreo

Primero se llevó a cabo una prueba piloto dentro de los ambientes de laboratorios de la UCB – Tupuraya, para perfeccionar y ajustar el método, realizando comparaciones entre sustancias para la digestión y separación por densidad, diferentes tipos de lavado del filtro de fibra de vidrio con la muestra (para recuperar la mayor cantidad de MPs capturados después del muestreo de 24 h) y diferentes métodos de conteo visual para la identificación de los MPs como ser: el uso del *software Image J*, una tinción con fluoresceína y un conteo bajo un microscopio fluorescente y un corte en el filtro inicial (previamente muestreado) en un cuadrado de 1x1 cm. Optando la última opción como la más adecuada y eficiente, debido a que las anteriores presentaron una serie de dificultades, como la sobreposición de partículas, al momento de realizar la identificación y conteo de los MPs; obteniendo así el ajuste de la metodología y emplearla en el muestreo en la zona de estudio (zona Sur – La Maica).

Una vez ajustada la metodología se realizó la selección de los puntos de muestreo, instalando dos puntos en la zona Sur – La Maica (Unidad Educativa “Bolivia B” y Unidad Educativa “Demetrio Canelas”) y un punto de control en la zona Norte – Tupuraya (Campus de la Universidad Católica Boliviana) donde se realizó previamente la prueba piloto (para obtener concentraciones de diferentes puntos de la ciudad, sabiendo que la zona Sur es más contaminada que la zona Norte).

4.2 Descripción de los puntos de muestreo

Los principales factores a tomar en cuenta en los puntos de muestreo seleccionados fueron los factores climáticos, geográficos, focos de emisión naturales y antropogénicos, tráfico vehicular, residuos sólidos cercanos y diversas actividades en ambas zonas, además de los siguientes criterios: Disponibilidad y seguridad de los equipos de muestreo de material particulado y la accesibilidad al sitio de muestreo. En la Figura 4 se puede observar la distribución de los tres puntos de muestreo seleccionados.

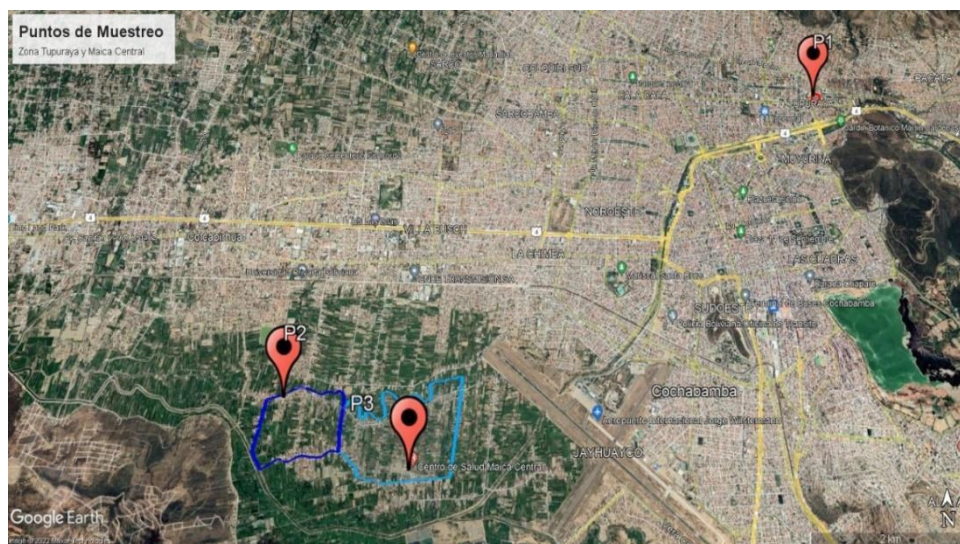


Figura 4. Selección de las áreas de muestreo en La Maica, imagen de Google Earth.

Para el punto de control (P1), se llevó a cabo dentro de los ambientes de laboratorio de la UCB (zona Norte - Tupuraya), ubicado cerca a la calle con mayor flujo vehicular. En cuanto a los puntos de muestreo P2 y P3, se ubicaron los equipos en la zona Sur - La Maica, instalando el P2 en la Unidad Educativa “Bolivia B” y el P3 en la Unidad Educativa “Demetrio Canelas” caracterizadas por presentar un mediano a bajo tráfico vehicular y cantidades elevadas de polvo debido a calles de tierra en la zona Figura 5.

Se realizaron tres campañas de monitoreo simultáneamente en los tres puntos, cada campaña se realizó durante 7 días consecutivos, con un tiempo de muestreo de 24 h. La primera campaña se realizó en las fechas (viernes 03 al jueves 09 de diciembre del 2021) en la que se tiene el día del peatón, la segunda se realizó en fechas (martes 22 al lunes 28 de marzo del 2022) y la tercera campaña se realizó en fechas (martes 10 al lunes 16 de mayo del 2022).

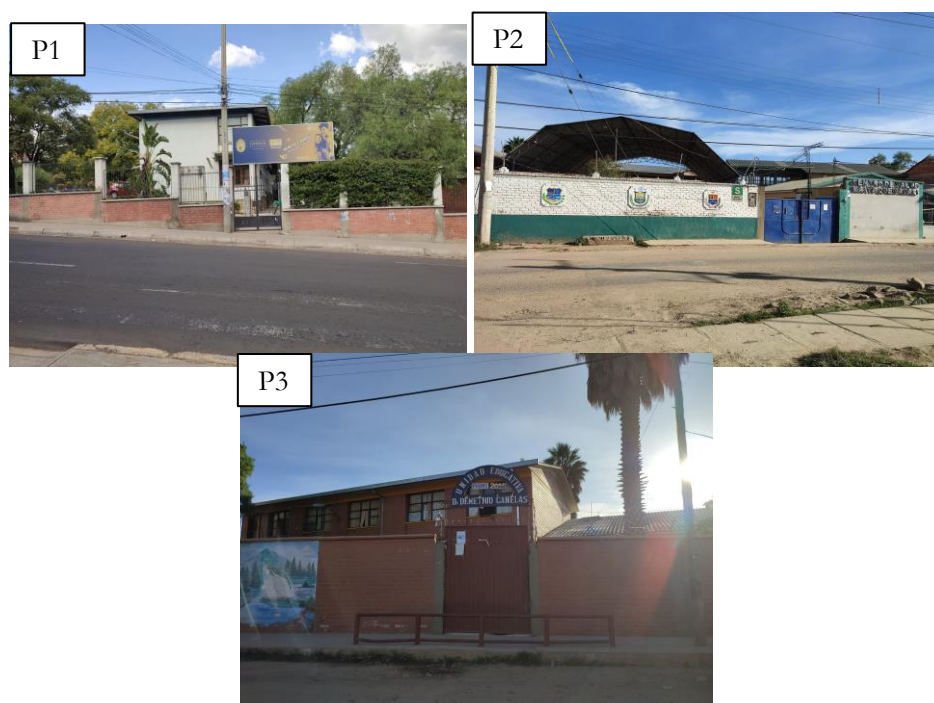


Figura 5. Puntos de muestreo P1 (zona Norte – Tupuraya), P2 y P3 (zona Sur – La Maica).

4.3 Tratamiento y análisis de las muestras

Antes de realizar el muestreo se preparó el material a utilizar, donde se lavó previamente todos los materiales con una solución de HNO_3 y agua destilada y almacenándolos con papel de aluminio para prevenir contaminación de las muestras. Para la manipulación de los filtros se empleó una pinza plana. Los filtros de muestreo de fibra de vidrio fueron tratados a una temperatura de $475\text{ }^\circ\text{C}$ durante 3 h dentro una mufla, para eliminar fibras y contaminantes. Posteriormente se llevaron los filtros al desecador por 24 h en cajas Petri para su ambientación, finalizando con el pesado de todos los filtros 4 veces para obtener un valor promedio.

Posterior al tratamiento y pesado de los filtros se realizó el muestreo por 24 h en los tres puntos de muestreo durante una semana, se almacenaron los filtros muestreados en sus respectivas cajas Petri y se los llevó al desecador para su ambientación por 24 h y control de humedad. Posteriormente se volvieron a pesar los filtros 4 veces para obtener un valor promedio, anotando y guardando las muestras nuevamente en el desecador hasta el tratamiento de digestión y separación por densidad.

4.4 Análisis en laboratorio después del muestreo

Se guardó un filtro en “blanco” para ser sometido a los mismos procedimientos que las muestras a continuación, lo cual permitirá evaluar la posible contaminación externa en el transcurso de la metodología.

Una vez sacados los filtros del desecador, se realizó un corte de $1 \times 1 \text{ cm}^2$ para facilitar el conteo y extrapolar los resultados obtenidos para todo el filtro. Posteriormente se realizó la transferencia de muestras mediante el lavado de los filtros en vasos de vidrio, sujetando con la pinza plana los filtros ya cortados y realizando el lavado con un chorro de la piseta con agua destilada (filtrada previamente para reducir posible contaminación), realizando este paso 3 veces para un buen lavado del filtro, alcanzando así una medida de 15 ml en el vaso de vidrio. Todo el procedimiento se llevó a cabo bajo una campana de flujo laminar, previamente limpiada con papel, seguido de la limpieza con 70 % de etanol en una toalla de papel.

4.4.1 Digestión

Se realizó la digestión de materia orgánica y minerales aplicando con ayuda de una pipeta, 9 ml de H_2O_2 de 100 volúmenes, a los 15 ml de agua destilada previamente usados para el lavado, después se llevó la muestra del vaso de vidrio al horno a una temperatura de 40°C tapando las muestras con papel aluminio (sin presionar mucho en los bordes del vaso de vidrio) y dejarlo reposar por 7 días.

Pasados los 7 días (solo si es necesario), se añadió más solución de H_2O_2 si la muestra presentaba turbidez y se observaba una considerable cantidad de materia orgánica o minerales y se dejó reposar por 24 h en horno a 40°C , se observó que el material biogénico y plástico se decolora durante el proceso de preparación de la muestra (digestión con H_2O_2) que hace que las partículas de plástico de colores sean menos visibles y más difíciles para diferenciar del material biogénico residual (post digestión).

La muestra digerida se llevó a filtración utilizando un filtro de nitrocelulosa cuadrículada, reteniendo en este los MPs de la muestra, se realizó el lavado enjuagando las paredes del vaso de vidrio y del sistema de filtración con ayuda de agua destilada filtrada, cerrando puertas y ventanas evitando así el flujo de aire y una posible contaminación de las muestras. Para finalizar se extrajo el filtro de nitrocelulosa y sujetándolo encima de un vaso de vidrio con ayuda de la pinza plana se realizó el lavado de los MPs retenidos en el filtro con agua destilada filtrada, hasta alcanzar un volumen de 15 ml.

4.4.2 Separación por densidad

Para la separación por densidad se empleó una solución con una densidad de 1,37 g/ml. La solución de separación se preparó con ZnCl_2 en solución acuosa al

36, 2 % (m/m), este valor se obtuvo interpolando la densidad hallada en la tabla de Perry y Green (1997).

Para esto, primero se preparó una solución con 10, 86 g de $ZnCl_2$ añadidos a 15 ml de agua destilada filtrada (sin la muestra) en un vaso de vidrio agitando hasta diluir bien, posteriormente se añadió esta solución al vaso de vidrio con 15 ml que contiene la muestra de MPs; obteniendo así un volumen de 30 ml; se agitó y dejó reposar por 1 h a temperatura ambiente, tapado con papel aluminio, para evitar la contaminación de la muestra.

Después de 1 h, se separó la fracción suspendida (la cual contiene los MPs) vertiéndola en el sistema de filtración con un filtro nuevo de nitrocelulosa con ayuda de la pipeta, (cabe mencionar que el filtro de nitrocelulosa tiene una porosidad de 0,45 μm). Este filtro de nitrocelulosa, se almacenó dentro de una caja Petri y se llevó al horno a 40 °C durante 1h, con la tapa semi abierta para el secado, finalizando se llevó la muestra al microscopio óptico para realizar la identificación y el conteo de los MPs capturados.

4.4.3 Análisis en laboratorio identificación visual

Se realizó la identificación y conteo de partículas de MPs en un microscopio óptico con un aumento de 10X, mediante una caracterización física por medio de la identificación de bordes (como ser puntiagudos o lisos y de forma redonda u ovalada), tamaño (iguales y menores a 10 micras) y colores (azules, celestes, rojos, naranjas y grises), logrando así la cuantificación a través de un barrido por todo el filtro de nitrocelulosa, finalizando con la aplicación de la fórmula (1) para obtener las concentraciones de MPs/m^3 para cada punto de muestreo por campaña. El volumen de aire captado fue calculado a partir del flujo del equipo de muestreo y el tiempo de exposición del filtro.

Cabe recalcar que, para las impurezas que pueden encontrarse en los filtros, es necesario realizar un tratamiento previo, (como se mencionó anteriormente) para eliminar fibras y contaminantes que puedan interferir en la identificación y conteo.

4.4.4 Variación espacial y temporal

En esta última etapa se procedió de acuerdo al monitoreo en los puntos de muestreo, donde se representó por medio de gráficas de barras las diferentes variaciones diarias obtenidas en los tres puntos de muestreo, al igual que las variaciones estacionales por campaña en los tres puntos muestreados.

Finalizando con una variación espacial, usando una imagen satelital la cual muestra los promedios de las concentraciones de MPs encontrados en los diferentes puntos de muestreo y su posible asociación a diferentes factores que contribuyen a la aparición de estas partículas plásticas en relación con las zonas muestreadas, considerando aspectos del clima, geografía, población, tráfico vehicular y posibles fuentes de emisión, vistas en la selección de zonas de muestreo, finalizando de esta manera con las conclusiones y recomendaciones.

5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En las observaciones realizadas de las muestras obtenidas en la prueba piloto y en los tres puntos de muestreo, se logró identificar por medio de una caracterización física las partículas suspendidas en el aire (iguales y menores a 10 micras), antes de aplicar un método de digestión y separación por densidad, obteniendo de esta manera la identificación de: materia orgánica y/o minerales, fibras y partículas de MPs, como puede observarse en la Figura 6.

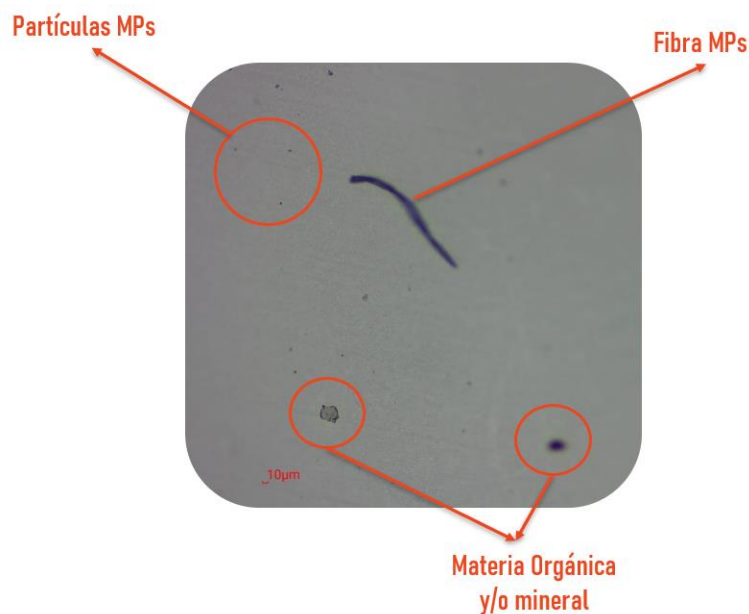


Figura 6. Identificación de partículas encontradas.

5.1 Primera campaña de muestreo

Para los resultados obtenidos en la primera campaña de muestreo realizada en el mes de diciembre del año 2021, se tomó en cuenta la precipitación y su influencia en las muestras, debido al efecto de precipitación que empuja todas las partículas contaminantes hacia el suelo, provocando una variación en los datos obtenidos (Martínez, 2019), teniendo en cuenta que, el 64% de las precipitaciones anuales se concentran en los meses de diciembre enero y febrero (Navarro *et al.*, 2015; Renner y Velasco, 2020).

5.2 Segunda campaña de muestreo

En cuanto a los resultados obtenidos se puede observar un incremento significativo en cuanto a la concentración de MPs encontrados en el aire, esto se debe al mes de marzo donde se inicia con la época semiseca del año, según la bibliografía (Navarro *et al.*, 2015; Renner y Velasco, 2020), además de la presencia de vientos en toda la ciudad, tomando en cuenta que este factor determina el transporte del

contaminante. También se debe tomar en cuenta el índice de ventilación y la altura en la cual esta actúa con mayor efectividad y la posible recirculación del aire a causa de esto (Zhang *et al.*, 2020).

Tercera campaña de muestreo

En cuanto a los resultados obtenidos de la tercera campaña de muestreo, se debe tomar en cuenta la época seca y principios de invierno en la ciudad, tomando en cuenta el fenómeno de inversión térmica en esta época del año, la cual impide una buena circulación de los contaminantes en las zonas bajas de la ciudad de Cochabamba, incrementando así las concentraciones de PM suspendido y por tanto las concentraciones de MPs encontrados.

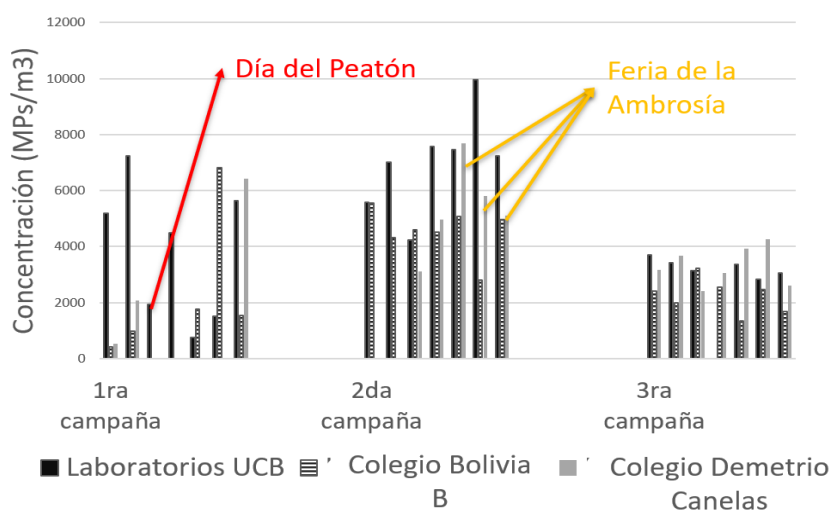


Figura 7. Concentración diaria de microplásticos encontrados en las tres campañas de muestreo (diciembre 2021(1ra), marzo (2da) y mayo (3ra) 2022)

En la Figura 7, se observa la concentración de MPs suspendidos en el aire en los tres puntos de muestreo zona Norte - Tupuraya (color verde oscuro) y zona Sur – La Maica (donde se encuentran los dos colegios) de color verde claro y plomo en las diferentes campañas de muestreo, distinguiendo de mejor manera la variación entre campañas.

Se observó que en la primera campaña existió un decremento notorio (flecha roja) en el tercer día en la zona Norte, a razón de llevarse a cabo la actividad del “Día del Peatón y la Bicicleta” en la ciudad de Cochabamba y en cuanto a la segunda campaña puede observarse un incremento notorio en los últimos tres días (flechas amarillas) en el Colegio Demetrio Canelas en la zona Sur a razón de llevarse a cabo la “Feria de la Ambrosía” donde se realizaron diferentes actividades como fuegos pirotécnicos, entradas folklóricas y constante actividad de gente y vehículos.

Sin embargo, para observar las diferencias estadísticamente significativas entre los puntos de muestreo por campaña, se utilizó el programa ANOVA, obteniendo como resultados que: en la primera campaña (época de lluvia), para los tres puntos de muestreo no existe una diferencia estadísticamente significativa, pudiendo ser por la presencia de lluvias en toda la ciudad, asentando así las partículas suspendidas de MPs; en cambio, la segunda campaña (presencia de vientos) y tercer campaña (principios de época seca) si presentan diferencias estadísticamente significativas para los tres puntos de muestreo, pudiendo ser por la recirculación de los contaminantes, contaminación de fondo, tráfico vehicular y las diferentes actividades ya mencionadas con anterioridad las cuales potencian la aparición de los MPs.

En cuanto al promedio de las tres campañas de muestreo, se tiene la siguiente Figura 8; donde se observa que la zona más afectada por la presencia de MPs suspendidos es la zona Norte (laboratorios UCB) a razón de una mayor actividad vehicular comparada con la zona de La Maica, que si bien esta se encuentra en la zona Sur de la ciudad no presenta una elevada circulación de tráfico vehicular por la zona de muestreos; presenta mayor cobertura vegetal por consiguiente retención de humedad y posible captura de contaminantes atmosféricos. Cabe mencionar que si bien La Maica se encuentra dentro de la zona Sur la cual presenta una alta contaminación del aire, esta zona muestreada no se encuentra en el centro más poblado y contaminado.

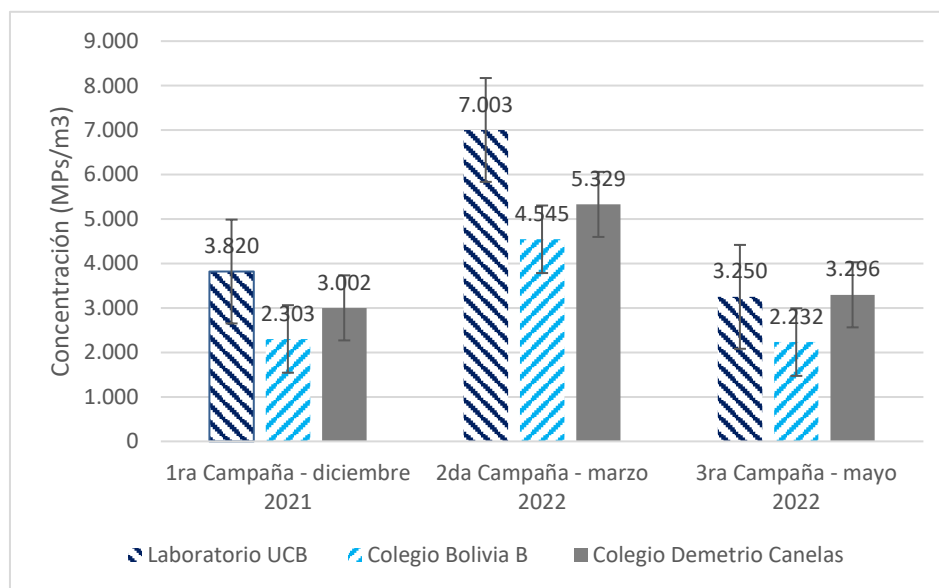


Figura 8. Variación espacial y temporal de los promedios de concentración de MPs en las tres campañas de muestreo realizadas en la zona Tupuraya y Maica.

Se logró obtener un mapa satelital de la distribución espacial de MPs donde se observa los niveles de contaminación por microplásticos encontrados en los tres

puntos de muestreo explicados anteriormente y las variaciones en las concentraciones de los contaminantes debido a factores asociados a la localización de los puntos de muestreo; como ser el clima época de lluvia y seca, vientos, que pueden observarse en las barras de diferentes tonos de gris respectivamente (Tabla de la Figura 9).

Además de posibles fuentes de contaminaciones cercanas ya mencionadas como ser el tráfico vehicular, limpieza, caminos de tierra y actividades festivas que se realizaron en la zona de La Maica, las cuales incrementan el tráfico vehicular y actividades cercanas a los dos colegios donde se instalaron los equipos de muestreo.

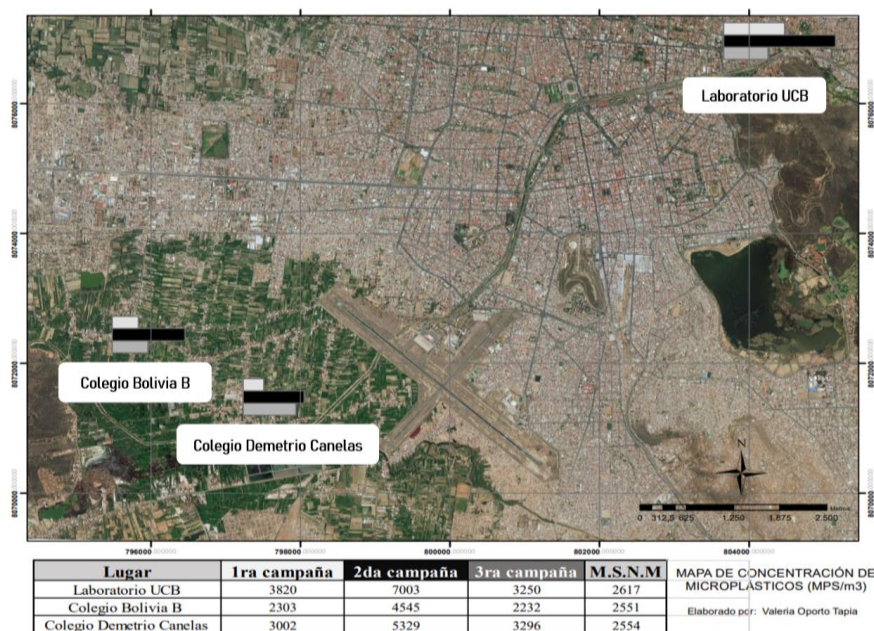


Figura 9. Distribución espacial de contaminación por microplásticos en los tres puntos de muestreo (diciembre 2021, marzo 2022 y mayo 2022)

Cabe mencionar que los MPs encontrados pueden ser de clasificación según el polímero de origen del plástico en: PS, PMMA, PU, PP, LDPE, EVA, HPDE, PA, PA6,6 y PC, los cuales corresponden a materiales como envases desechables, plásticos transparentes, fibras elásticas, juguetes, equipos de laboratorio, componentes automotrices, jeringas desechables, entre otros que se encuentran dentro de estas densidades de los polímeros.

Como valores finales en cuanto a promedios obtenidos de las tres campañas de muestreo, las cantidades fueron las siguientes: 4.691 MPs/m³ en los ambientes de laboratorio UCB (zona Norte - Tupuraya) y en la zona Sur - La Maica 3.027 MPs/m³ en el colegio Bolivia B y 3.876 MPs/m³ en el colegio Demetrio Canelas. Teniendo en cuenta que en el colegio Demetrio Canelas se anulaban varias muestras al no cumplir las 24 h requeridas para el conteo. Obteniendo la concentración promedio

de MPs suspendidos en las tres campañas de muestreo para los tres puntos muestreados (Figura 10).

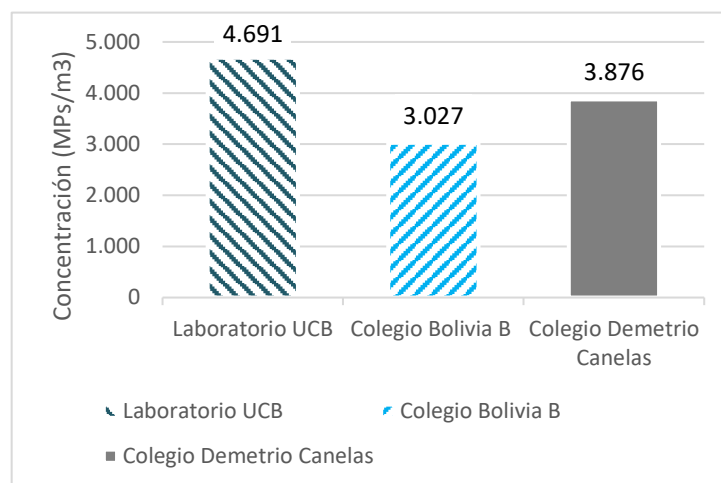


Figura 10. Concentración promedio de las tres campañas (diciembre 2021, marzo 2022 y mayo 2022) de muestreo en la zona Norte y Sur de la ciudad de Cochabamba

Debido a que puede existir un rango de error por realizar el conteo de los MPs a simple vista bajo el microscopio óptico, se realizó los cálculos para determinar la variación estándar, donde se seleccionó tres filtros muestreados al azar para volver a realizar el conteo dos veces. Se promedió los datos de las 3 muestras y se observó un error porcentual de 19,1 %, siendo los límites de error de $1.364,11 \pm 260,52$ MPs/m³.

Se comparó los datos obtenidos del presente estudio, con un estudio realizado en Indonesia donde se tomó en cuenta factores como la densidad del tráfico vehicular, para la ubicación de sus tres puntos de muestreo cerca a estas zonas más transitadas, obteniendo la siguiente tabla comparativa (Tabla 3).

Tabla 3. Comparación de resultados con un estudio realizado en Indonesia.

Lugar	Factor Volumen Tráfico	MPs/m ³	Tamaño	Tiempo muestreado	Horas muestreadas	País	Referencia
Laboratorio UCB	Alto tráfico vehicular	4.691	Menor a 10 micras	1 semana durante 3 meses	24 h	Bolivia	Presente estudio
Colegio Bolivia B	Mediano tráfico vehicular	3.027	Menor a 10 micras	1 semana durante 3 meses	24 h	Bolivia	Presente estudio
Colegio Demetrio Canelas	Bajo tráfico vehicular	3.876	Menor a 10 micras	1 semana durante 3 meses	24 h	Bolivia	Presente estudio
Calle con alto volumen de tráfico	Alto tráfico vehicular	174,90	Menor a 1,6 micras	3 días	13 h	Indonesia	(Dipareza <i>et al.</i> , 2019)
Calle con mediano volumen de tráfico	Mediano tráfico vehicular	131,75	Menor a 1,6 micras	3 días	13 h	Indonesia	(Dipareza <i>et al.</i> , 2019)
Calle con bajo volumen de tráfico	Bajo tráfico vehicular	94,69	Menor a 1,6 micras	3 días	13 h	Indonesia	(Dipareza <i>et al.</i> , 2019)

Se observó una similitud en cuanto a las concentraciones elevadas debido a la densidad del tráfico vehicular presente en los tres puntos de muestreo, tanto en el estudio de Indonesia como en el presente estudio; y bajas concentraciones en los puntos con mediano a bajo tráfico vehicular en ambos estudios. Por lo que el factor de tráfico vehicular es muy importante en las concentraciones obtenidas de MPs debido al rodamiento y desgaste de las llantas, erosionando los materiales con el cual están hechas incluyendo el plástico y la resuspensión del polvo y contaminantes donde muchos terminan suspendidos en el aire ocasionando la contaminación por MPs suspendidos en el aire en los tres puntos de muestreo.

5.3 Análisis de fuentes de contaminación externa en las muestras dentro los laboratorios de la Universidad

De manera paralela se observó una posible contaminación externa con partículas mayores a los 10 micrómetros, en donde predominaron partículas de color celeste y rojo y en cuanto a las fibras, de color azul (Figura 11). Sin embargo, la ser fibras, es posible que estas partículas no sean retenidas en el impactador por presentar un radio hidrodinámico menor a 10 micras.

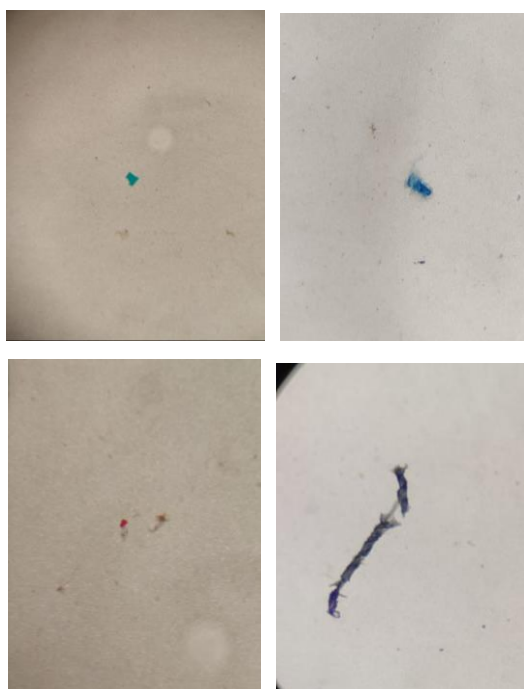


Figura 11. Fragmentos (izquierda) de microplásticos y fibras (derecha) encontradas en los filtros por posible contaminación externa.

La contaminación encontrada en las muestras puede ser a razón de la posible liberación de fibras o partículas provenientes de la bata de laboratorio de algodón y las toallas de papel utilizadas para la limpieza del área de trabajo, además de una

posible contaminación cruzada en el sistema de filtración (para las muestras de $ZnCl_2$). Este tipo de contaminación es casi imposible de evitar, tomando en consideración medidas rigurosas de prevención de la contaminación. Una alternativa es usar batas de laboratorio y toallas de colores fuertes reconocibles que pueden ayudar a identificarlos y excluir las fibras encontradas en muestras ambientales y la limpieza del sistema de filtraciones entre muestras se puede mejorar sumergiéndolo en ácido u otra solución limpiadora, además del agua destilada ya utilizada (Prata *et al.*, 2020).

5.4 Comparación del material particulado (PM_{10}) y microplásticos menores o iguales a 10 micras encontrados en los tres puntos de muestreo

Finalmente, se realizó un análisis de laboratorio de las tres campañas de muestreo, con diferentes concentraciones encontradas en cuanto al PM_{10} y MPs suspendidos en el aire.

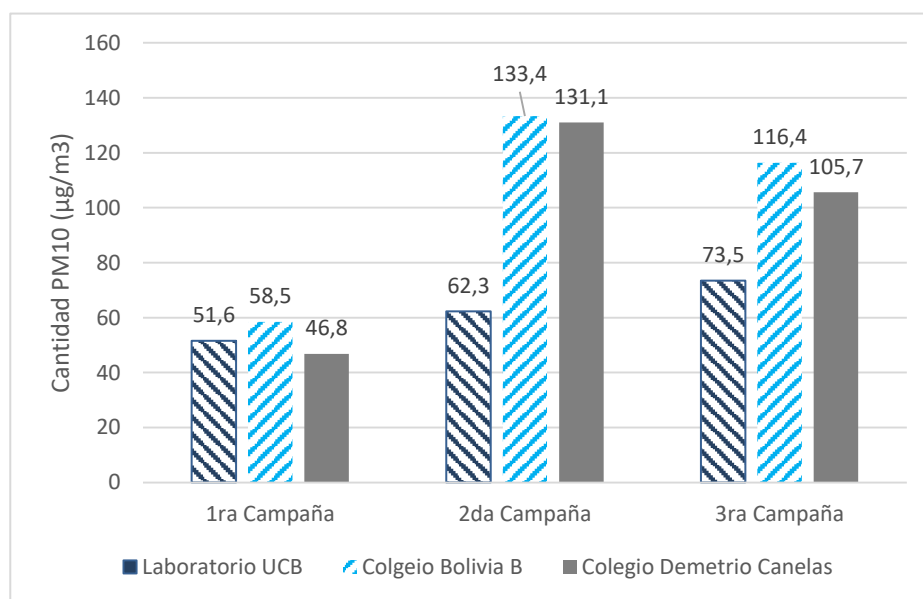


Figura 12. Concentración de PM_{10} encontrado en las tres campañas de muestreo (diciembre 2021, marzo 2022 y mayo 2022)

Se puede observar en la Figura 12, que la zona Sur de La Maica (colegio Bolivia B y Demetrio Canelas) presenta una mayor concentración de PM_{10} en comparación con la zona Norte – Tupuraya (Laboratorio UCB), esto pudo deberse principalmente a la resuspensión de partículas PM_{10} debido a la rodadura de vehículos al presentar calles de tierra, turbulencia de los vientos y contaminación de fondo que dispersa y transporta contaminantes de otras zonas, provocando episodios de contaminación. Mientras que las menores concentraciones de la zona Norte puede ser a razón de presentar calles asfaltadas en su mayoría, disminuyendo la resuspensión de partículas.

Sin embargo, en cuanto a la concentración de MPs en las tres campañas de muestreo, se observó que existe mayor concentración en la zona Norte – Tupuraya a comparación que en la zona Sur (Ver Figura 8), pudiendo ser principalmente a razón de, la mayor actividad que existe en la zona (densidad poblacional) y el alto tráfico vehicular, dado que son factores que potencian la aparición de MPs así como una mayor generación de residuos sólidos, los cuales al degradarse provocan contaminación de fondo de diversas zonas que son transportados por las turbulencia de vientos y la recirculación de estos contaminantes microplásticos. En cuanto a las concentraciones de MPs encontrados en La Maica se debieron principalmente a la limpieza de canales y basura, la “Feria de la ambrosía” y el moderado - menor tráfico vehicular existente.

Si bien no se observó una misma relación de concentración de MPs y PM_{10} en las tres campañas en la zona Norte de Tupuraya y la zona Sur de La Maica, se puede indicar que en la zona Norte (Laboratorio UCB) existe mayor presencia de MPs que en la zona Sur (colegio Bolivia B y Demetrio Canelas), a pesar de ser una zona con poco material particulado.

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el presente estudio se desarrolló un método de determinación de MPs en la fracción PM_{10} del aire que consiste en el uso de filtros de fibra de vidrio para la recolección de las partículas, el lavado con agua del filtro a presión moderada, la digestión sustancias inorgánicas y orgánicas con peróxido de hidrógeno (H_2O_2) de 100 volúmenes, separación de los MPS por floración en una solución de Cloruro de zinc ($ZnCl_2$) al 36,2% y la identificación por medio de una caracterización física y conteo óptico bajo el microscopio con un aumento de 10X para facilitar y optimizar la identificación y la cuantificación de las partículas de MPs suspendidos en el aire.

Según los resultados obtenidos del conteo de MPs, se obtuvieron concentraciones promedio de microplásticos en aire con: 4.691 MPs/m^3 en la zona Norte - Tupuraya y en La Maica (zona Sur – estudio) 3.027 MPs/m^3 en el colegio Bolivia B y 3.876 MPs/m^3 en el colegio Demetrio Canelas. La variabilidad de las concentraciones en los meses de diciembre (2021), marzo (2022) y mayo (2022) podría estar relacionada al clima, densidad poblacional, RS cercanos, volumen del tráfico vehicular y las diferentes actividades realizadas en las zonas. Además, se observó una variación espacial entre los tres puntos de monitoreo en las diferentes campañas, posiblemente debido a factores climáticos y principales fuentes de aporte de MPs en el aire, presentando una mayor concentración en la zona Norte – Tupuraya debido al mayor tráfico vehicular (el cual por fricción de las llantas genera MPs), la densidad poblacional, constante actividad y por tanto una mayor generación de RS. Sin embargo, las menores concentraciones de MPs para la zona Sur – La Maica, puede ser debido al mediano a bajo tráfico vehicular, actividades festivas y de limpieza realizadas en las fechas de muestreo y las fábricas ubicadas en la zona (donde predominan las ladrilleras).

Se determinó que existen diferencias estadísticamente significativas en la segunda campaña - marzo (2022) y tercera campaña - mayo (2022) para los tres puntos de muestreo. Aparentemente, la causa es la resuspensión y generación de los MPs es por el tráfico vehicular, actividades realizadas en las zonas, recirculación de los MPs por presencia de vientos (segunda campaña) y el comienzo de la época seca, potenciando la retención de los MPs en la atmósfera por el fenómeno de la inversión térmica (tercera campaña).

Si bien La Maica se encuentra dentro de la zona Sur, esta no se encuentra en un lugar céntrico (en donde existe una mayor actividad y contaminación por RS), por lo cual, presentó una menor concentración de MPs, en comparación con las concentraciones de la zona Norte – Tupuraya. No obstante, se observó una mayor concentración de PM_{10} en la zona Sur – La Maica, a causa de factores principales como el tráfico vehicular que provoca la resuspensión de partículas, (al ser calles de tierra) e incrementando así las concentraciones de PM_{10} en el aire a comparación de la zona Norte – Tupuraya, la cual presenta menores concentraciones de PM_{10} , a razón de una mejor circulación del aire en la zona y presentar calles pavimentadas en su mayoría.

De esta manera, se obtuvieron los primeros datos en el país en cuanto a la existencia de microplásticos suspendidos en el aire en la zona de la Maica en Cochabamba Bolivia.

Se recomienda que se realicen más estudios sobre estas métricas y la relación que existe entre PM y MPs viendo sus concentraciones máxicas, además de muestrear a una mayor frecuencia de muestreo para mejores resultados, realizar un análisis de dispersión de los contaminantes por vientos y una caracterización química de los MPs encontrados para poder clasificarlos y determinar su origen, empleando otros métodos como el Raman o el FTIR.

Agradecimientos

A la Mgr. Estela Herbas, al Ing. Eduardo Lange, al Mgr. Ricardo Sahonero, a la Mgr. Miriam Camacho, al Ing. Sergio Avilés y a la Mgr. Mary Hidalgo por toda su ayuda a lo largo de este estudio, a todo el personal de laboratorio por su ayuda a lo largo del análisis y a los directores de los colegios Lic. Félix Garcia y Lic. Maritza Ignacio quienes hicieron posibles los muestreos en La Maica.

Bibliografía

- [1] Acosta, I. (2014). *Caracterización de microplásticos primarios en el ambiente marino de una playa urbana en Cartagena de Indias*.
https://repositorio.unicartagena.edu.co/bitstream/handle/11227/4191/TE_SISENTREGADAFINAL.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- [2] Aldunate, P., Paz, O., & Halvorsen, K. (2006). *Los efectos de la contaminación atmosférica por PM10 sobre la salud ciudad de La Paz - Bolivia*.
http://www.scielo.org.bo/pdf/ran/v3n2/v3n2_a18.pdf
- [3] Alvarez, G. (2020). *Detección y monitoreo de microplásticos en sedimentos costeros de marismas de la costa Norte del estuario de Bahía Blanca*.
file:///C:/Users/hp/Downloads/Tesis Maestría Ing. Ambiental Alvarez Guadalupe M. 2020.pdf
- [4] Arango, S., Carrillo, T., & Bedoya, N. (2015). *Ventajas y desventajas del microscopio óptico y el electrónico*. Prezi.com.
- [5] Barrientos, J. (2019). Plástico: El desecho interminable, ¿jamás degradable? *ACADEMIA DE CIENCIAS DE MORELOS, A.C.*
<https://acmor.org/storage/files-previous/qX1o7PzsBx9QP8x1V4ORIBHPmX7RoYywOzbWYNuO.pdf>
- [6] Calla, L., & Luján, M. (2018, marzo). Inventario de emisiones de fuentes móviles con una distribución espacial y temporal para el área metropolitana de Cochabamba, Bolivia. *SciELO*.
http://scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1683-07892018000100005
- [7] Campanale, C., Savino, I., Pojar, I., Massarelli, C., & Uricchio, V. (2020). A Practical Overview of Methodologies for Sampling and Analysis of Microplastics in Riverine Environments. *SUSTAINABILITY*.
<https://www.mdpi.com/2071-1050/12/17/6755>
- [8] Carrales, B. (2019). Metodologías para el muestreo de la calidad del aire. *Vid supra visión científica, 11(1)*.
<https://www.ciirdurango.ipn.mx/assets/files/ciirdurango/docs/VIDSUPRA/REVISTAS/VIDSUPRA DIGITAL VOL 11 NUM 1 JUN2019.pdf>
- [9] Castañeta, G., Gutiérrez, A., Nacaratte, F., & Manzano, C. (2020). Microplásticos: un contaminante que crece en todas las esferas ambientales, sus características y posibles riesgos para la salud pública por exposición. *SciELO, 37*. http://www.scielo.org.bo/scielo.php?pid=S0250-54602020000300005&script=sci_arttext
- [10] Celaya. (2020). *Detección y caracterización de micro/nano plásticos en productos de higiene personal*. <https://core.ac.uk/download/pdf/324149073.pdf>
- [11] CESEL. (2013). Plan de manejo ambiental (PMA) del proyecto instalación central térmica Quillabamba y sistema de transmisión asociado Santa Ana, La Convención, Cusco. *Cesel Ingenieros*.
https://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/DGGAE/DGGAE/ARCHIVOS/PMA ELECTRICIDAD DEL PERU ELECTROPERU S.A/4.4.2 - 4.4.4 Calidad de aire_Rui_Rad.pdf
- [12] Crawford, C. B., & Quinn, B. (2017). Microplastic Pollutants. *ScienceDirect*.
<https://www.sciencedirect.com/book/9780128094068/microplastic-pollutants>

- [13] Delgado, O. (2019). *Implicaciones de la exposición a microplásticos en la salud humana*. [https://digibug.ugr.es/bitstream/handle/10481/56407/TFM Olga Delgado Fimia.pdf?sequence=3&isAllowed=y](https://digibug.ugr.es/bitstream/handle/10481/56407/TFM%20Olga%20Delgado%20Fimia.pdf?sequence=3&isAllowed=y)
- [14] Dipareza, A., Rizki, N., Fadli, A., & Boedisantoso, R. (2019). *Microplastic Pollution in the Ambient Air of Surabaya, Indonesia*. <https://cwejournal.org/vol14no2/microplastic-pollution-in-the-ambient-air-of-surabaya--indonesia>
- [15] Enders, K., Lenz, R., Ivar Do Sul, J., Tagg, A., & Labrenz, M. (2020). When every particle matters: A QuEChERS approach to extract microplastics from environmental samples. *ELSEVIER*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2215016120300042>
- [16] ENVIRA IOT. (2020). ¿Qué es la inversión térmica y cómo se relaciona con la contaminación? *ENVIRA IOT*. <https://enviraiot.es/que-es-inversion-termica-relaciona-contaminacion/>
- [17] Fonnegra, A. (2019). Posible efecto de los microplásticos en nuestra salud. *BIOGENIC*. <https://www.biogeniccolombia.org/nuestros-artiacuteculos-de-temporada/posible-efecto-de-los-microplasticos-en-nuestra-salud>
- [18] Frias, J., Nash, R., Pagter, E., & O'Connor, I. (2018). Standardised protocol for monitoring microplastics in sediments. *ResearchGate*. <https://repository.oceanbestpractices.org/bitstream/handle/11329/1206/D4.2StandardisedprotocolformonitoringMPsinsediments.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [19] Fundación para la Transferencia Tecnológica. (2014). *Determinación de un índice de remoción de contaminantes atmosféricos para el territorio nacional*.
- [20] García, A. (2019). *Microplásticos en el medio ambiente y su impacto en la cadena trófica*. <http://openaccess.uoc.edu/webapps/o2/bitstream>
- [21] Gonzales, C. T., & Jiménez, E. Q. (2020). *Contaminación ambiental: partículas PM10 y PM 2,5 y efectos en la salud*. <http://revistas.uigv.edu.pe/index.php/exegesis/article/view/673/587>
- [22] Hann, S., Darrah, C., Sherrington, C., Blacklaws, K., Horton, I., & Thompson, A. (2018). Reducing Household Contributions to Marine Plastic Pollution. *eunomia*, 22. https://cdn.friendsoftheearth.uk/sites/default/files/downloads/reducing-household-plastics_0.pdf
- [23] Herbas, E., Challapa, A., Vargas, M., Arce, A., Teran, M., & Lara, O. (2017). Evaluación de la vulnerabilidad socio ambiental del sector lechero de La Maica (Cochabamba) frente al cambio climático. *SiELO*. http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1683-07892017000200006
- [24] IBNORCA. (2018). *Calidad del aire - Determinación de material particulado en suspensión con un diámetro aerodinámico equivalente menor a 10 y 2.5 micrómetros*

- (PM10 y PM2.5) - Muestreo activo - Método gravimétrico.
<https://www.ibnorca.org/tienda/catalogo/detalle-norma/nb-62014:2018-nid=3461->
- [25] INE. (2017). *Manual 1: Principios de medición de la calidad del aire*.
<https://sinaica.inecc.gob.mx/pags/guias.php>
- [26] Laguna, J., Pérez, R., Espinoza, M., & Castillo, J. (2019). Acciones realizadas por la Contraloría General del Estado para disminuir los riesgos de la contaminación del aire. *CONTRALORÍA INFORMA*.
https://www.contraloria.gob.bo/portal/Portals/0/upload/BOLETIN_CONTAMINACION_AMBIENTAL_compressed.pdf
- [27] Leahy, S. (2020). Los microplásticos también están presentes en el aire. *National Geographic*. <https://www.nationalgeographic.com/planeta-o-plastico/2019/04/los-microplasticos-tambien-estan-presentes-en-el-aire>
- [28] Linera, C. (2021). *Dinámica espacial de los microplásticos en el cauce principal de la cuenca del río Rocha*. Católica Boliviana - «San Pablo».
- [29] LOS TIEMPOS. (2013, mayo 19). *Contaminación en Cochabamba es mayor en invierno*.
[https://www.lostiempos.com/actualidad/local/20130519/contaminacion-cochabamba-es-mayor-invierno#:~:text=Por sus características de ser,tóxicos \(metales pesados%2C polvo y](https://www.lostiempos.com/actualidad/local/20130519/contaminacion-cochabamba-es-mayor-invierno#:~:text=Por sus características de ser,tóxicos (metales pesados%2C polvo y)
- [30] Luján, M. (2009). *Red de Monitoreo de la Calidad del Aire Red MoniCA*.
<https://docplayer.es/15973426-Red-de-monitoreo-de-la-calidad-del-aire-red-monica.html>
- [31] Marcos, A. (2020). Los microplásticos de las llantas de carros están contaminando el océano y el Ártico. *EL ESPECTADOR*.
<https://www.elespectador.com/ambiente/los-microplasticos-de-las-llantas-de-carros-estan-contaminando-el-oceano-y-el-artico-article/#:~:text=Los microplásticos de las llantas de>
- [32] Martínez, E. (2019). *Que no te engañen: la lluvia NO limpia la contaminación*.
<https://www.greenpeace.org/mexico/blog/2300/que-no-te-enganen-la-lluvia-no-limpia-la-contaminacion/>
- [33] Mastrangelo, G., Fedeli, U., Fadda, E., Milán, G., Turato, A., & Pavanello, S. (2003). *Lung cancer risk in workers exposed to poly(vinylchloride) dust: a nested case-referent study*. <https://oem.bmj.com/content/oemed/60/6/423.full.pdf>
- [34] Montenegro, E., & Luján, M. (2017). Análisis de la variación estacional de la contaminación atmosférica y su relación con variables climáticas en el valle central de Cochabamba, Bolivia. *SciELO*.
http://www.scielo.org.bo/pdf/ran/v8n3/v8n3_a11.pdf
- [35] Navarro, G., Aguirre, L., & Maldonado, M. (2015). Biodiversidad, ecología y conservación del valle central de Cochabamba. *Centro de biodiversidad y genética (CBG) UMSS*.

- [36] OMS. (2014). *7 millones de muertes cada año debidas a la contaminación atmosférica*. <https://apps.who.int/mediacentre/news/releases/2014/air-pollution/es/index.html>
- [37] OMS. (2016). *La OMS publica estimaciones nacionales sobre la exposición a la contaminación del aire y sus repercusiones para la salud*. <https://www.who.int/es/news/item/27-09-2016-who-releases-country-estimates-on-air-pollution-exposure-and-health-impact>
- [38] OMS. (2021). *Contaminación del aire ambiente (exterior)*. [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health#:~:text=El valor actual de 10,NO2 en estado gaseoso](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health#:~:text=El valor actual de 10,NO2 en estado gaseoso).
- [39] OPINIÓN. (2020, marzo 9). *La Maica produce en medio de metales pesados y 37 pesticidas*. <https://www.opinion.com.bo/articulo/cochabamba/maica-produce-medio-metales-pesados-37-pesticidas/20200309003114755385.html>
- [40] Perry, H, R., & Green, W, D. (1997). *Perry's Chemical Engineers' Handbook* (seventh). <https://imtk.ui.ac.id/wp-content/uploads/2014/02/perrys-handbook-LENGKAP.pdf1997>
- [41] Pineda, J. (2020). *Cómo Afecta el Plástico al Medio Ambiente*. <http://www.temasambientales.com/>
- [42] Pires, A. (2019). Aplicaciones biotecnológicas a la degradación de residuos plásticos. *Dialnet*. <https://www.upo.es/cms1/export/sites/upo/moleqla/documentos/Numero35/Numero-35.pdf>
- [43] Prata, J., Castro, J., Costa, J., Duarte, A., Cerqueira, M., & Rocha-Santos, T. (2020). An easy method for processing and identification of natural and synthetic microfibers and microplastics in indoor and outdoor air. *ELSEVIER*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2215016119303383#bib0035>
- [44] Quintero, M. (2018). Así es como los neumáticos de tu automóvil arrojan microplásticos nocivos al medio ambiente. *TEKCRISPY*. <https://www.tekcrispy.com/2018/11/12/neumaticos-microplasticos-medio-ambiente/>
- [45] Red MoniCA. (2006). *Red de Monitoreo de la Calidad del Aire*. <http://www.asocam.org/sites/default/files/publicaciones/files/7aaecbfef10481ed572e0f1ee8b7a51.pdf>
- [46] Renner, S., & Velasco, C. (2020). *Geología e hidrología del valle central de Cochabamba*.
- [47] Rosado, V., Vazquez, A., Alvarez, J., & Mendoza, N. (2018). *Caracterización de microplásticos y muestreo de residuos sólidos urbanos de la playa de Tuxpan, Veracruz*. https://www.researchgate.net/publication/329454095_Caracterizacion_de_

- microplasticos_y_muestreo_de_residuos_solidos_urbanos_de_la_playa_de_Tuxpan_Veracruz
- [48] Sánchez, I. (2019). *Microplásticos y su interacción con los antibióticos* [COMPLUTENSE].
http://147.96.70.122/Web/TFG/TFG/Memoria/IVAN_SANCHEZ_IZQUIERDO.pdf
- [49] SARTORIUS. (2021). *Filtros de microfibra de vidrio de borosilicato y cuarzo 100%* Sartorius. <https://www.sartorius.com/en/products-es/lab-filtration-purification-es/basic-filtration/glass-quartz-microfibre-es>
- [50] Sturzenegger, G. (2021). Plásticos: la otra pandemia. *BID mejorando vidas*. [https://blogs.iadb.org/agua/es/plasticos-pandemia/#:~:text=La pandemia de COVID-19,y reciclaje de esos materiales.&text=En 2019%2C se produjeron cerca,a nivel](https://blogs.iadb.org/agua/es/plasticos-pandemia/#:~:text=La%20pandemia%20de%20COVID-19,y%20reciclaje%20de%20esos%20materiales.&text=En%202019%2C%20se%20produjeron%20cerca%20de%20un%20nivel)
- [51] Terán, A. (2022). Contaminación Atmosférica Gestión 2021. *SNLA*.
http://snia.mmaya.gob.bo/web/modulos/PNGCA/publicaciones/items/14042022-030417-130459_209/14042022-030417-130459_209.pdf
- [52] Toledo, Á. (2019). *Revisión bibliográfica de los métodos de análisis de micro (nano) plásticos en el medio ambiente y en la biota marina*. <http://e-spacio.uned.es/fez/view/bibliuned:master-Ciencias-CyTQ-Matoledo>
- [53] Valdés, A. (2020). *Microplásticos por tierra, mar y aire*.
<https://verdeyazul.diarioinformacion.com/microplasticos.html>
- [54] Viceministerio de Planificación Y Coordinación. (2006). *Resumen del diagnóstico ambiental*.
[http://vpc.planificacion.gob.bo/uploads/PDM_S/03_COCHABAMBA/030101 Cochabamba.pdf](http://vpc.planificacion.gob.bo/uploads/PDM_S/03_COCHABAMBA/030101_Cochabamba.pdf)
- [55] Zhang, Y., Kang, S., Allen, S., Allen, D., Gao, T., & Sillanpaa, M. (2020). Atmospheric microplastics: A review on current status and perspectives. *ELSEVIER*.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001282521930621X>