

Design of an emissions purification system with a sugarcane bagasse filter to reduce pollutants in Chorrillos poultry farms.

Olenka Franccesca, Aedo Mejía¹, Luciana Andrea, Burga Beteta², Marianella Isabell, Herbozo Pérez³, Daniela Alicia, Huaman Olarte⁴, Victor Yair, Flores Cáceres⁵, Gustavo Adolfo Sánchez Contreras⁶
Universidad Privada del Norte, Perú, n00318377@upn.pe, n00322996@upn.pe, n00341304@upn.pe,
n00389264@upn.pe, n00321219@upn.pe, Gustavo.sanchez@upn.edu.pe

Abstract – This research proposes the design of an emission purification system based on a filter made from activated sugarcane bagasse, aimed at reducing pollution generated by rotisserie chicken restaurants (pollerías) in Chorrillos, Lima. The methodology was quasi-experimental with a mixed approach, using passive sampling and measurements through the Airecare application, along with experimental tests in a simulated system. The filter was developed through pyrolysis and chemical activation with vinegar, resulting in a material with good adsorption capacity that visibly reduced the smoke plume in terms of color, odor, and persistence in the air. The system, composed of a metal box, a PVC tube, and a fan, effectively simulated a pollería chimney. In parallel, cadmium (Cd) analysis in air revealed concentrations ranging from 0.0108 to 0.0304 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, all below the Peruvian Environmental Quality Standard (ECA) limit of 0.09 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, with the highest value recorded at point P1, located on an active chimney.

Keywords — Air pollution, sugarcane bagasse, activated carbon, rotisserie chicken emissions, PM2.5, air quality, sustainable filter

Diseño de un sistema purificador de emisiones con filtro de bagazo de caña de azúcar para disminuir los contaminantes en las pollerías de Chorrillos

Olenka Franccesca, Aedo Mejía¹; Luciana Andrea, Burga Beteta²; Marianella Isabell, Herbozo Pérez³; Daniela Alicia, Huamán Olarte⁴; Víctor Yair, Flores Cáceres⁵; Gustavo Adolfo Sánchez Contreras⁶
Universidad Privada del Norte, Perú, n00318377@upn.pe, n00322996@upn.pe, n00341304@upn.pe,
n00389264@upn.pe, n00321219@upn.pe, Gustavo.sanchez@upn.edu.pe

Resumen— La presente investigación propone el diseño de un sistema purificador de emisiones basado en un filtro de bagazo de caña de azúcar activado, orientado a reducir la contaminación generada por las pollerías en Chorrillos, Lima. La metodología fue de tipo cuasi-experimental, con enfoque mixto, utilizando muestreo pasivo y mediciones con la aplicación Airecare, además de pruebas experimentales en un sistema simulado. El filtro fue elaborado mediante pirólisis y activación química con vinagre, obteniendo un material con buena capacidad de adsorción, que logró reducir visiblemente el penacho de humo en cuanto a color, olor y permanencia. El sistema, conformado por una caja metálica, un tubo de PVC y un ventilador, simuló eficazmente una chimenea de pollería. Paralelamente, el análisis de cadmio (Cd) en el aire reveló concentraciones que oscilaron entre 0,0108 y 0,0304 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, todas por debajo del límite de la Norma de Calidad Ambiental (ECA) peruana de 0,09 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, registrándose el valor más alto en el punto P1, ubicado en una chimenea activa.

Palabras claves — Contaminación del aire, bagazo de caña de azúcar, carbón activado, emisiones de pollerías, PM2.5, calidad del aire, filtro sostenible

Keywords — Air pollution, sugarcane bagasse, activated carbon, rotisserie chicken emissions, PM2.5, air quality, sustainable filter

I. INTRODUCCIÓN

La contaminación del recurso aire a causa del aumento anormal de emisiones atmosféricas es un problema que con el tiempo se ha ido agravando, principalmente en aquellos países y ciudades que están en vías de desarrollo y que presentan actividades industriales, comerciales y de servicio en su territorio que no poseen medidas de control ambiental eficientes, perjudicando la calidad del aire de dicho lugar, como es el caso de la ciudad de Lima. Según detalla el Inventario de Emisiones de Fuentes Fijas en diversas ciudades, el distrito metropolitano de Lima presenta una gran cantidad de fuentes puntuales, entre ellas principalmente el parque automotor y las industrias; y una considerable cantidad de fuentes área de emisiones, encontrándose dentro de ellas las actividades de servicio y comercio que dentro de sus procesos productivos generan combustión; como por ejemplo las pollerías [1].

Los establecimientos de pollerías están distribuidos por toda la ciudad, ya que este servicio es ampliamente aceptado por la población, lo cual representa un beneficio económico para los empresarios dedicados a esta actividad. Sin embargo, el problema surge durante el proceso de obtención del producto, es decir, el pollo a la brasa, que constituye el objeto de esta investigación. De acuerdo con el informe previamente citado y el estudio realizado por el Programa Aire Limpio en las ciudades de Lima, Arequipa, Cusco y Trujillo con el respaldo de la Cooperación Suiza, el humo emitido por los hornos de las pollerías, producto de la combustión de la grasa en combinación con combustibles como carbón vegetal, gas licuado de petróleo, kerosene o leña, genera una serie de partículas contaminantes, entre las que se encuentran óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono y otros gases. Estos contaminantes son liberados directamente al aire sin ningún tratamiento previo, lo que agrava su impacto ambiental. Esto se suscita debido a que no existen disposiciones legales por parte del gobierno local que regulen lo que se emite por las chimeneas de las pollerías o que propicien la utilización de métodos para purificar sus emisiones. De igual manera, a pesar de que se tiene conocimiento de lo perjudicial que son estas emisiones para el ambiente e indirectamente para la salud de la población, no se han propuesto Límites Máximos Permisibles para este tipo de actividad en el Perú; y por ser una actividad peruana, no se puede tomar referencia de normas internacionales. Como no hay exigencia hacia las pollerías, los dueños de estos establecimientos pueden ver como un gasto innecesario la aplicación de tratamientos para sus efluentes gaseosos y también los costos altos de inversión en estos tratamientos pueden ser poco atractivos para ellos [2].

Por lo tanto, los hornos a leña, carbón representan una significancia positiva sobre la calidad del aire [3]; por otro lado, la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) refiere que se emite humo cuando se combusciona leña y otra materia orgánica; donde este humo contiene contaminantes tóxicos que son nocivos para el aire y puede contribuir a reducir la visibilidad del ambiente. Por otro lado, según la OMS refiere que, las carnes cocidas al carbón emiten compuestos orgánicos

volátiles (VOCs) e hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs), estos compuestos son dañinos para la salud de la población, en algunos casos por ejemplo el benzopireno es un agente cancerígeno. En tal sentido, la identificación de los contaminantes atmosféricos que se emiten por combustión de carbón vegetal es una actividad de significancia importante para la gestión de la calidad del aire; además de contar con información actualizada que permita proponer acciones de mejora para la reducción de la contaminación atmosférica [4].

Por ejemplo, en el estudio de [5], nos menciona que los niveles de contaminantes en distintos métodos de cocción muestran que el grilling, técnica utilizada principalmente en las pollerías para asar pollos a la brasa, es la que genera mayores emisiones a través de las chimeneas. Se observa que durante el grilling se alcanzan concentraciones de aproximadamente 105 ppm de compuestos orgánicos volátiles (VOCs) y 67 ppm de monóxido de carbono (CO), muy superiores a las de otros métodos como frying o cooking. Además, los niveles de CO₂ alcanzan los 900 ppm, reflejando una combustión intensa. Estas emisiones son expulsadas al ambiente por las chimeneas, lo que convierte a las pollerías en fuentes importantes de contaminación del aire urbano, especialmente si se ubican en zonas con alta densidad de locales y poca ventilación.

En ese sentido, [6], desarrollaron una propuesta tecnológica orientada a enfrentar este problema. Su objetivo fue diseñar un sistema de filtro en chimeneas para minimizar emisiones de monóxido de carbono (CO) y material particulado PM10 en Ocaña, Colombia. Elaboraron un prototipo funcional que actúa durante la etapa de cocción donde ocurren las mayores emisiones con la finalidad de reducir la contaminación generada por la combustión incompleta de combustibles fósiles. Este sistema logró disminuir la presencia de gases como CO, CO₂, NO₂ y SO₂, los cuales están asociados a efectos negativos tanto para la salud humana como para el medio ambiente. El estudio concluyó que es posible implementar procesos de depuración con resultados efectivos, ofreciendo un referente teórico-tecnológico aplicable en contextos similares. El carbón activado es un material altamente poroso con gran capacidad de adsorción, lo que lo convierte en un componente fundamental en sistemas de purificación de agua y aire. Su producción puede llevarse a cabo a partir de diversas materias primas orgánicas, siendo el bagazo de caña de azúcar una opción destacada por su abundancia, bajo costo y propiedades antimicrobianas. A través de procesos que incluyen la combustión incompleta y la activación química, se obtiene un material con una superficie interna excepcionalmente alta, capaz de retener compuestos orgánicos e impurezas. Esta tecnología, desarrollada y perfeccionada por investigadores brasileños, no solo contribuye al aprovechamiento de residuos agroindustriales, sino que también promueve prácticas sostenibles y económicamente viables en la gestión de desechos [7].

El objetivo de este proyecto de investigación es, a través de un enfoque metodológico y científico, desarrollar un sistema purificador de aire utilizando un filtro hecho a base de bagazo de caña de azúcar activado. Este sistema tiene como finalidad reducir las emisiones contaminantes generadas por la combustión en las pollerías, una actividad económica ampliamente extendida y popular en el Perú. Actualmente, existe una notable falta de normativas específicas para regular las emisiones atmosféricas provenientes de las chimeneas de pollerías, lo que favorece la liberación directa al aire de contaminantes como material particulado (PM2.5 y PM10), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NOx), entre otros. Esta situación impacta negativamente tanto la calidad del aire como la salud pública, especialmente en áreas urbanas con alta densidad poblacional como el distrito de Chorrillos en Lima.

II. METODOLOGÍA

La metodología utilizada en el presente proyecto es de tipo cuasi-experimental, ya que se evalúa el impacto del sistema purificador de emisiones con filtro de bagazo de caña de azúcar antes y después de su aplicación en un entorno real (pollerías), sin manipular todas las variables externas. La investigación tiene un enfoque mixto, donde se combinan elementos cuantitativos y cualitativos. El enfoque cuantitativo se centra en la obtención y análisis de datos medibles relacionados con la concentración de metales pesados en partículas (PM2.5 y PM10) y gases contaminantes. Para esto, se utilizará la aplicación Airecare para medir y registrar los parámetros de calidad del aire, permitiendo una evaluación y después de la intervención con el filtro. Por otro lado, el enfoque cualitativo se aplica durante la fase de simulación y prueba del prototipo del filtro. En este caso, se realizarán observaciones visuales y cualitativas sobre el desempeño del sistema, su adaptación al entorno y los posibles ajustes necesarios durante el proceso. Este enfoque permitirá documentar aspectos del comportamiento del filtro en condiciones reales y visualizar posibles mejoras o desafíos durante su implementación. Asimismo, la investigación es de tipo descriptivo, ya que permite caracterizar y detallar las condiciones de la calidad del aire en las pollerías y en los puntos cercanos a ellas, antes y después de la intervención con el sistema purificador. La población de estudio está conformada por establecimientos comerciales del distrito de Chorrillos que emiten gases contaminantes producto de la combustión en hornos de cocción, específicamente las pollerías. Para esta investigación se ha seleccionado una muestra no probabilística intencionada de dos pollerías ubicadas en la Av. Guardia Civil Sur, distrito de Chorrillos, por su alta afluencia de clientes y uso continuo de carbón vegetal en su proceso de cocción.

La unidad de análisis corresponde a la calidad del aire en puntos cercanos a estos establecimientos. Las mediciones se realizarán en zonas ubicadas a una distancia máxima de 50 metros de las pollerías, que incluyen un colegio y tres viviendas

residenciales. Estos lugares han sido seleccionados por su cercanía directa a las fuentes emisoras y por representar espacios donde la exposición a contaminantes atmosféricos podría tener efectos en la salud de la población. Asimismo, se reconoce que la calidad del aire en estos puntos también puede estar influenciada por otros factores externos, como el tránsito vehicular, la densidad urbana y otras actividades comerciales cercanas.

En tal sentido, se ha realizado la zonificación con el propósito de identificar y clasificar las áreas que podrían verse afectadas por las emisiones emitidas por las chimeneas de las pollerías situadas en el centro comercial, en el distrito de Chorrillos. Estas emisiones incluyen gases, olores, vapor con grasa, partículas finas y compuestos que, al liberarse en el aire, pueden afectar la calidad del ambiente urbano cercano. La clasificación se ha dividido en tres zonas según el grado de afectación, considerando un análisis visual del entorno urbano y las distancias desde el punto emisor, considerando factores como la densidad urbana, la cercanía de viviendas, centros educativos y comerciales, así como la posible dirección predominante del viento en la zona. Cabe resaltar que, si bien el foco de esta investigación son las emisiones de las pollerías, la calidad del aire también puede verse alterada por otras fuentes contaminantes, como el parque automotor y otras actividades industriales y comerciales presentes en el área de estudio.

calidad del aire utilizada, estos valores sitúan a Chorrillos en la categoría "Moderado", que abarca concentraciones entre 12,1 y 35,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Esto indica que la calidad del aire en el distrito es aceptable, aunque podría representar un riesgo leve para personas particularmente sensibles, como aquellas con problemas respiratorios. Aunque Chorrillos no se encuentra entre los distritos con mayor contaminación, aún existe un margen de mejora en la calidad del aire.

Durante el periodo analizado, se registró en el distrito un promedio de concentración de PM2.5 de 15,73 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, lo cual se ubica en la categoría de calidad del aire “Moderado”, según los rangos establecidos. Esto indica que, si bien la calidad del aire es generalmente aceptable, podría representar riesgos leves para personas sensibles, como personas con asma, adultos mayores o niños pequeños. El valor máximo alcanzado durante este periodo fue de 58,87 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, el cual entra en la categoría de “Insalubre”, reflejando que hubo al menos un día con niveles peligrosamente altos de contaminación, con potenciales efectos adversos en la salud de la población en general. Por otro lado, el valor mínimo registrado fue de 3,90 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, considerado como “Bueno”, lo que muestra una importante variabilidad en la calidad del aire a lo largo del mes.

El gráfico de línea sobre los promedios diarios de PM2.5 revela fluctuaciones importantes: los niveles se mantuvieron por debajo de los 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ durante gran parte del mes, pero se observan picos notables alrededor del día 26 y 27, alcanzando incluso un valor de 32,72 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, muy cercano al límite superior de la categoría "Moderado". Estos repuntes podrían estar relacionados con factores como el clima, aumento del tránsito vehicular, actividad industrial o quema de residuos. Por otro lado, entre las principales actividades económicas del distrito, las pollerías juegan un papel relevante en la generación de emisiones atmosféricas. Estas, junto con otros establecimientos como pizzerías, restaurantes, talleres mecánicos y madereras, operan en zonas densamente pobladas como el AAHH. Villa Municipal, Rinconada de Villa, Indoamérica, La Sagrada Familia, Las Garzas, Túpac Amaru, Tacalá, así como en urbanizaciones como Cedros de Villa y La Campiña. A pesar de contar en algunos casos con sistemas de extracción de humo, muchos de estos locales carecen de mecanismos adecuados de depuración, como filtros de carbón activado o chimeneas ecológicas. Esta deficiencia provoca la liberación directa de material particulado, grasas volátiles y gases tóxicos al ambiente, generando malos olores persistentes que afectan a las viviendas colindantes.

Esta zona comprende el área de mayor exposición a las emisiones, afectada constantemente por los residuos gaseosos de las chimeneas debido a la cercanía inmediata. Aquí se perciben con mayor intensidad los olores, la grasa suspendida y el hollín. Las construcciones colindantes reciben directamente los contaminantes sin que haya tiempo suficiente para su dispersión. Las zonas afectadas son: edificaciones multifamiliares, zonas comerciales, farmacias, colegios y otros negocios.

En 2023, el distrito de Chorrillos registró un nivel promedio de contaminación del aire de $12,34 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que en 2024 aumentó ligeramente a $15,05 \mu\text{g}/\text{m}^3$. El promedio total de ambos años es de $13,73 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Según la escala de



Fig. 1 Zonificación del área de estudio

El impacto de estas emisiones, aunque localizado, contribuye al deterioro general de la calidad del aire, especialmente cuando se suma a otras fuentes contaminantes como el parque vehicular del distrito. La alta concentración de rutas de transporte público y asociaciones de mototaxistas en avenidas como Defensores del Morro, Guardia Civil, El Sol y Principal agrava la situación. En conjunto, estas fuentes fijas y móviles de contaminación están empezando a reflejarse en los valores promedio anuales de calidad del aire, que han mostrado un leve pero constante incremento de un año a otro. Por tanto,

es esencial que la Municipalidad de Chorrillos y los entes competentes refuerzen el control ambiental sobre las pollerías y otros comercios similares, promoviendo la instalación obligatoria de sistemas de control de emisiones. Esto no solo mejoraría las condiciones de vida de los vecinos, sino que también ayudaría a estabilizar e incluso reducir los niveles de contaminación atmosférica en el distrito.

Metodología para la elaboración de carbón activado a partir de bagazo de caña de azúcar

Se utilizaron 100 g de bagazo de caña de azúcar, vinagre blanco, una lata de acero, leña, agua destilada (1.5 L aprox.), molino manual, olla de acero inoxidable, recipientes plásticos o de vidrio y una bolsa tipo ziploc. El bagazo se secó al sol por varios días y luego se carbonizó mediante pirólisis en una lata de acero con leña durante 15 minutos. Tras la carbonización, se enfrió con agua y se lavó para eliminar impurezas, dejándolo secar al sol por 24 horas. El carbón seco fue triturado hasta obtener un polvo fino, que luego se activó químicamente con vinagre (proporción 1:2), calentándolo hasta su evaporación. Se añadió agua destilada, se hirvió por 10 minutos y se dejó reposar por 15. Finalmente, se evaporó el líquido restante, se secó el carbón activado al sol y se pulverizó antes de almacenarlo en una bolsa ziploc.



Fig. 2 Elaboración de carbón activado a base de bagazo de caña de azúcar

Metodología para elaboración del prototipo del purificador de aire a base de bagazo de caña de azúcar

Se utilizaron un ventilador de PC de 12 voltios, un tubo de PVC de 4 pulgadas, un soplete, papel filtro con carbón activado de bagazo de caña de azúcar, malla para filtro de aire acondicionado, tijeras o cuchillo, tornillos y un atornillador. El tubo de PVC fue cortado a una longitud de 20 a 30 cm y moldeado con un soplete en uno de sus extremos para permitir el acople del ventilador. El filtro se preparó cortando tanto el papel impregnado con carbón activado como la malla, ajustándolos al diámetro del tubo: la malla fue colocada en la parte frontal, que recibe el aire exterior, y el papel de carbón activado detrás, formando el sistema de filtrado. Además, se

construyó una caja metálica que simula una chimenea de pollería, dentro de la cual se encendió carbón vegetal con ayuda de thinner, generando una fuente controlada de emisiones. El tubo de PVC con el sistema de filtro fue acoplado a esta caja, permitiendo el paso del humo a través del material filtrante. Finalmente, el ventilador se instaló en el extremo opuesto al filtro, orientado para succionar el humo desde el interior de la caja metálica y forzarlo a atravesar el sistema de purificación, expulsándolo hacia el exterior. Este diseño permitió observar y evaluar visualmente la efectividad del filtro en condiciones controladas.

El filtro elaborado operará como un sistema de purificación de aire para capturar contaminantes generados en fuentes de emisión como las pollerías, especialmente en sus extractores de aire o campanas de cocina, donde se liberan grasas, partículas finas, compuestos orgánicos volátiles (COV) y olores derivados de la combustión y cocción de alimentos. El diseño consiste en un tubo de PVC con un ventilador que genera succión forzada, y un sistema de filtrado compuesto por una malla y papel filtro impregnado con carbón activado obtenido del bagazo de caña de azúcar. Este carbón activado, por su alta porosidad y capacidad de adsorción, retiene partículas y compuestos contaminantes, reduciendo la carga contaminante del aire expulsado. Para su adecuación en pollerías u otros establecimientos similares, el sistema puede adaptarse directamente en la salida de los ductos de ventilación, sirviendo como un filtro secundario antes de que el aire sea liberado al exterior. Su diseño compacto y modular permite colocarlo en serie con otros filtros si se requiere mayor eficiencia. Además, al estar fabricado con materiales accesibles y reutilizables, representa una alternativa económica y sostenible que puede ser implementada por pequeños negocios para cumplir con normativas ambientales básicas, reducir molestias a la comunidad y mejorar las condiciones del entorno.

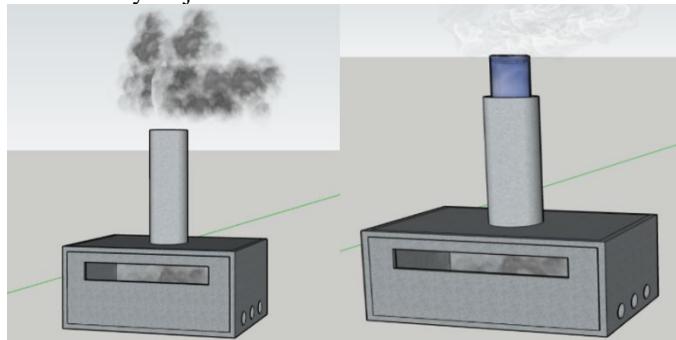


Fig. 3 Simulación de chimenea de pollería con y sin el sistema de purificación de aire

Metodología para determinar metales pesados en las partículas

Las placas se colocaron en dos establecimientos de pollerías ubicados en la Av. Guardia Civil Sur, en el distrito de Chorrillos, seleccionados como puntos de emisión directa de contaminantes. La muestra de esta investigación fue determinada mediante un muestreo no probabilístico, en función de criterios técnicos y metodológicos específicos del

estudio, priorizando zonas con alta exposición poblacional. Además, se definieron seis puntos de evaluación pasiva en el entorno cercano a una distancia máxima de 50 metros con el fin de analizar la dispersión de los contaminantes emitidos: colegios cercanos y zonas residenciales. Los lugares seleccionados para la instalación de los equipos de monitoreo fueron escogidos por su proximidad a las fuentes emisoras (pollerías) y por el nivel de exposición a las emisiones atmosféricas, lo que permite realizar una comparación espacial entre zonas de diferente uso: zona educativa (colegio) y residencial (viviendas). Esta selección estratégica facilita evaluar el comportamiento y dispersión de los contaminantes en función del entorno. En todos los puntos seleccionados, las placas receptoras serán colocadas en los techos de las edificaciones, con el fin de garantizar una exposición adecuada al aire ambiente y minimizar interferencias físicas (tránsito peatonal, vehículos, manipulación, etc.). Esta ubicación asegura que las muestras obtenidas sean representativas de la calidad del aire del entorno. Además, en cada uno de los seis puntos de muestreo se instalarán dos placas receptoras, permitiendo mejorar la precisión, repetibilidad y confiabilidad de los datos recopilados.



Fig. 4 Ubicación de cada placa en cada punto asignado

CUADRO I
COORDENADAS UTM POR PUNTO ASIGNADO

PUNTOS	Coordenadas UTM
P1	283107.059E 8653637.987N
P2	283155.791E 8653616.985N
P3	283189.904E 8653673.226N
P4	283202.064E 8653577.798N
P5	283172.766E 8653447.297N
P6	283203.354E 8653447.297N
P7	283109.777E, 8653760.033N
P8	283110.775E, 8654763.036N
P9	283270.194E 8653534.202N
P10	283082.914E 8653680.564N
P11	283098.856E 8653776.054N
P12	283094.855E 8656778.057N

El muestreo pasivo se realizará durante un periodo de 5 días con el objetivo de determinar la presencia y concentración de metales pesados en el material particulado del aire ambiente. El día 15 de mayo a las 9:00 p.m. se colocaron las placas receptoras en los 6 puntos establecidos, donde permanecerán expuestas durante todo el periodo de evaluación. Estas placas permitirán capturar partículas en suspensión (PM10 y PM2.5) que podrían contener metales pesados como plomo (Pb), cromo (Cr), cadmio (Cd), arsénico (As), entre otros. Al concluir los 5 días, las placas serán retiradas cuidadosamente y llevadas al laboratorio para su análisis químico, utilizando técnicas especializadas que permitirán identificar y cuantificar dichos metales en las muestras recolectadas. Se utilizaron placas Petri, vaselina, espátula, agua destilada, vaso de precipitados de 100 ml, ácidos nítrico y clorhídrico concentrados (10 ml c/u), plancha de calentamiento, papel filtro, embudo de vidrio, solución jabonosa e incubadora. Los instrumentos de vidrio se lavaron con solución jabonosa, enjuagaron con agua de caño y destilada, y se secaron en incubadora por 30 minutos. Las partículas se recolectaron raspando las placas Petri y lavándolas con agua destilada, transfiriendo el contenido a vasos de precipitados. Luego, se realizó la digestión añadiendo 20 ml de agua destilada y 10 ml de ácido (HNO₃ o HCl). Finalmente, se ajustó el volumen a 50 ml con agua destilada para el análisis cuantitativo de metales.

III. RESULTADOS

Durante la simulación del sistema purificador diseñado con filtro a base de bagazo de caña de azúcar, se efectuaron dos pruebas experimentales comparativas: una sin el prototipo y otra con el prototipo instalado. En la primera etapa, sin la presencia del filtro, se empleó una caja metálica adaptada como chimenea, dentro de la cual se encendió carbón vegetal utilizando thinner, con el fin de reproducir de manera controlada la combustión típica de una pollería. Bajo esta

condición inicial, se evidenció un penacho de humo denso y persistente, con tonalidades que iban del gris oscuro al negro intenso, acompañado de un olor penetrante, químico e irritante. La textura del humo era espesa y se mantenía suspendida en el aire con amplia dispersión, generando una pluma visible que permanecía alrededor de 10 segundos antes de disiparse parcialmente. Estos resultados confirman la elevada concentración de material particulado y compuestos volátiles producto de la combustión incompleta y del uso de solventes en el encendido.



Fig. 5 Simulación sin el prototipo.

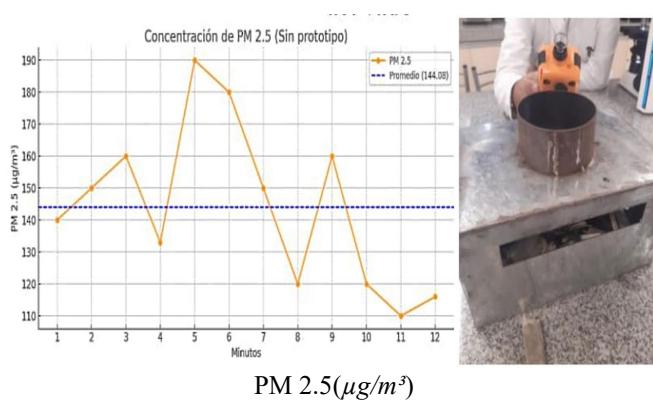


Fig. 6 Concentración de PM 2.5 sin prototipo

En la segunda etapa, se implementó el sistema purificador experimental, conformado por un tubo de PVC insertado en la caja metálica que actuaba como conducto de evacuación del humo. En el tramo central de dicho tubo se colocó el filtro de carbón activado elaborado a partir de bagazo de caña de azúcar, y en el extremo opuesto se incorporó un ventilador que facilitaba la succión y circulación de los gases a través del material filtrante. Al repetir la combustión bajo esta configuración, se registraron cambios notables en las características del penacho: el color del humo se tornó visiblemente más claro, en varios momentos casi transparente; el olor se redujo de manera significativa, pasando de un aroma

fuerte e irritante a uno mucho más tenue; y la textura del humo se observó ligera, con menor densidad y dispersión más rápida en el ambiente. El tiempo de permanencia del penacho en el aire se redujo de aproximadamente 10 segundos a menos de 4 segundos, lo que evidencia un aumento en la eficiencia de disipación.



Fig. 7 Simulación con el prototipo

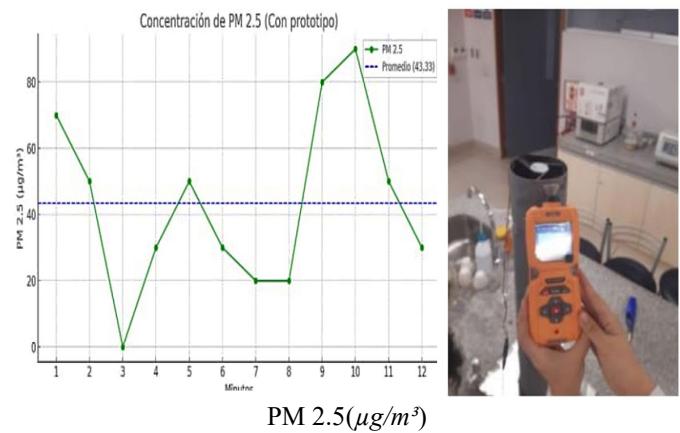


Fig. 8 Concentración de PM 2.5 con prototipo

Estos resultados experimentales sugieren que el uso de carbón activado a partir de bagazo de caña de azúcar constituye una alternativa viable para la reducción de contaminantes visibles y perceptibles generados en la combustión típica de actividades gastronómicas como las pollerías. El filtro no solo modificó la coloración y densidad del humo, sino que también disminuyó de manera tangible la intensidad del olor, lo cual constituye un indicador de retención de compuestos orgánicos volátiles y material particulado. En este sentido, el sistema

purificador diseñado demuestra potencial como tecnología accesible y sostenible, capaz de contribuir a la mitigación de la contaminación atmosférica a nivel local y a la mejora de la calidad del aire en entornos urbanos.

Evaluación de la concentración de Cadmio y Plomo presente en el material particulado sedimentado

CUADRO II

Concentraciones de cadmio (Cd) en aire ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) y su cumplimiento con el Estándar de Calidad Ambiental (ECA) peruano

Muestra	Cd en aire ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Comparación con ECA de Aire para Cd	¿Cumple?
P1	0.0304		Si
P2	0.0228		Si
P3	0.0196		Si
P4	0.0292		Si
P5	0.0260		Si
P6	0.0108		Si

La tabla presenta los resultados de concentración de cadmio (Cd) en aire obtenidos a partir de seis muestras (P1–P6) recolectadas mediante muestreo pasivo durante cinco días, con un volumen total de aire muestreado de 2.5 m^3 . Las concentraciones fueron convertidas a unidades ambientales ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) y comparadas con el Estándar de Calidad Ambiental (ECA) para aire establecido en Perú, cuyo valor límite para el cadmio es de 0.09 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Los resultados muestran que las concentraciones de Cd en todas las muestras cumplen y se encuentran muy por debajo de este límite, con valores que oscilan entre 0.0108 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (P6) y 0.0304 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (P1). Esto indica que, pese a la presencia detectada de cadmio en el ambiente, los niveles actuales no representan un incumplimiento normativo según la legislación peruana. Sin embargo, la detección constante de este metal en todas las muestras sugiere una exposición ambiental continua, posiblemente relacionada con actividades vehiculares, comerciales o emisiones urbanas en la zona de estudio (alrededor de un centro comercial en Chorrillos).

CUADRO III

Concentraciones de plomo (Pb) en aire ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) y su cumplimiento con el Estándar de Calidad Ambiental (ECA) peruano

Muestra	Pb en aire ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Comparación con ECA ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	¿Cumple?
P7	-0.0336		Si
P8	0.0472		Si
P9	-0.0668		Si
P10	-0.0640		Si
P11	0.0360		Si
P12	0.0388		Si

1.5

(Pb) en el aire obtenidos mediante un método pasivo con placas de vaselina, expresados en microgramos por metro cúbico ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) y comparados con el Estándar de Calidad Ambiental (ECA) del Perú, que establece un valor máximo permisible de 1.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para plomo en la fracción PM_{10} como promedio mensual. Todas las muestras analizadas (P7 a P12) cumplen ampliamente con el valor referencial establecido, presentando concentraciones muy por debajo del límite normativo. Las muestras P8, P11 y P12 registran valores positivos, siendo la más alta P8 con 0.0472 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, lo que representa apenas un 3% del valor permitido. Las demás muestras presentan valores negativos, lo que indica que el plomo no fue detectable o que se encuentra por debajo del límite de detección del método utilizado, lo cual es común cuando las concentraciones son extremadamente bajas. En general, los resultados sugieren que la calidad del aire en las zonas evaluadas no representa un riesgo por presencia de plomo, y aunque el método utilizado no discrimina partículas PM_{10} de forma específica, los valores obtenidos pueden considerarse una estimación referencial

IV. DISCUSIÓN

En nuestra simulación, se evaluó la efectividad de un sistema purificador diseñado con un filtro de bagazo de caña de azúcar activado. Se realizaron dos pruebas: una sin el filtro y otra con el filtro instalado. Sin el filtro, el humo producido por la combustión de carbón vegetal con thinner fue denso, oscuro, de olor penetrante y persistente por aproximadamente 10 segundos. Al instalar el filtro, el humo mostró un cambio evidente: se volvió más claro, con menor densidad, olor menos intenso y se disipó en menos de 4 segundos. Estos resultados visuales y sensoriales reflejan una mejora notable en la calidad del aire emitido, atribuible a la capacidad adsorbente del bagazo activado. Al comparar estos hallazgos con los obtenidos en el artículo “Reductor sostenible de emisiones de CO_2 elaborado con fibra de coco ‘ECO2 FILTER’” en [8], se observa un punto en común: ambos estudios emplean residuos agroindustriales como medio filtrante, aprovechando su estructura lignocelulósica, alta porosidad y superficie específica para la

adsorción de contaminantes. En el caso del ECO2 FILTER, se logró cuantificar una reducción del 67 % de CO₂ mediante mediciones con gasómetro. Aunque en nuestra simulación no se realizaron mediciones en ppm, la disminución perceptible del impacto visual y olfativo del humo sugiere una retención efectiva de gases y partículas contaminantes.

Una diferencia relevante es que nuestro filtro fue activado mediante pirólisis, lo que potencialmente incrementa su eficacia adsorbente, mientras que el filtro de coco fue utilizado de forma natural. Esto muestra dos enfoques sostenibles complementarios: uno orientado a potenciar el rendimiento mediante tratamiento térmico, y otro centrado en la simplicidad y bajo impacto ambiental. En ambos casos, se evidencia que los residuos agroindustriales pueden transformarse en soluciones tecnológicas viables para la reducción de emisiones, contribuyendo a mitigar la contaminación atmosférica generada por fuentes urbanas como las pollerías, y alineándose con los Objetivos de Desarrollo Sostenible 12 y 13.

Asimismo, los valores obtenidos de cadmio (Cd) en aire, estimados a partir del análisis de seis muestras ambientales recolectadas mediante el método pasivo de placas en la zona comercial de Chorrillos, oscilaron entre 0.0108 y 0.0304 µg/m³. Todos los resultados se encuentran por debajo del Estándar de Calidad Ambiental (ECA) para aire en Perú, que establece un límite de 0.09 µg/m³ para 24 horas [9]. Desde el enfoque normativo, estos niveles indican que la calidad del aire cumple con lo permitido, sin representar un riesgo inmediato para la salud humana. No obstante, la presencia constante de cadmio en todas las muestras revela una exposición ambiental sostenida. Este patrón coincide con hallazgos similares en otras ciudades. Por ejemplo, en [10] evaluaron el impacto de 45 pollerías en Tacna como fuentes emisoras de contaminantes atmosféricos por uso de carbón vegetal. Se estimaron emisiones anuales de 3.95 toneladas de partículas totales en suspensión (PTS), 2.87 t/año de NOx, 0.88 t/año de CO y 0.4 t/año de COV, lo que confirma que este tipo de actividad contribuye significativamente al deterioro de la calidad del aire urbano. De forma complementaria, el estudio de [11] en Puno, mediante técnica gravimétrica, identificó que las zonas con mayor concentración de partículas sedimentables (hasta 36.89 g/placa) se asociaban con características del entorno urbano, como el material de las vías públicas. A pesar de no superar los límites de la OMS, se detectaron diferencias significativas entre zonas ($p < 0.05$), lo que evidencia una distribución desigual de la contaminación atmosférica.

Asimismo, [12], al analizar factores de emisión relacionados con la preparación de comida rápida, reportaron altos niveles de gases contaminantes, como 5312.12 toneladas/año de CO₂ y 290.3 toneladas/año de CO, contrastando con las emisiones específicas detectadas en este estudio para PTS (3.95 t/año), NOx (2.87 t/año), CO (0.88 t/año) y COV (0.4 t/año), valores también representativos de fuentes comerciales como las pollerías. De la misma forma, los resultados obtenidos mediante el método pasivo con placas de vaselina muestran que las concentraciones de plomo (Pb) en

aire en las muestras analizadas son bajas, con valores que no superan los 0.0472 µg/m³, muy por debajo del límite establecido por el ECA peruano (1.5 µg/m³). No obstante, las variaciones entre puntos pueden reflejar la influencia de fuentes específicas del entorno, como el tránsito vehicular o actividades comerciales como pollerías que utilizan carbón como combustible. Estudios previos como el de [10], han señalado que las pollerías que emplean carbón vegetal pueden emitir partículas cargadas de metales pesados, entre ellos plomo y cadmio, como resultado de la combustión incompleta y del contenido natural de estos metales en la biomasa. Las emisiones de chimeneas mal diseñadas o sin sistemas de filtrado pueden liberar directamente contaminantes al entorno inmediato, afectando la calidad del aire en niveles bajos pero persistentes. Además, si estas pollerías se encuentran en zonas urbanas con alto flujo vehicular, el efecto puede ser acumulativo. Investigaciones como [13] demostraron que áreas con alta densidad de vehículos, en combinación con actividades de cocción comercial, presentaban concentraciones más elevadas de partículas totales y trazas metálicas, aun cuando estas no excedían los límites normativos. El plomo en aire puede provenir también del desgaste de frenos, lubricantes, o residuos de emisiones pasadas, especialmente en avenidas con tráfico pesado o lento.

En el presente estudio, si bien todas las muestras se encuentran por debajo del ECA, se observa que las muestras P8, P11 y P12 presentan las concentraciones más altas dentro del rango medido. Estas podrían estar influenciadas por la proximidad a chimeneas de pollerías, zonas de descarga de carbón o leña, o intersecciones vehiculares. El hecho de que las demás muestras presenten valores no detectables (negativos) refuerza la idea de que la distribución espacial del plomo en el aire puede estar asociada a fuentes locales específicas.

Por consiguiente, [14] señala que la combinación de fuentes difusas en entornos urbanos como talleres, restaurantes, paraderos puede contribuir a la presencia de metales pesados en el aire, aunque sus concentraciones individuales puedan ser bajas. Este contexto es coherente con los resultados obtenidos, donde no se detecta una contaminación crítica, pero sí se identifican patrones que merecen seguimiento si se busca mejorar aún más la calidad del aire urbano.

V. CONCLUSIONES

Este análisis es fundamental para el diseño de un sistema purificador de emisiones con filtro de bagazo de caña de azúcar, ya que permite comprender el comportamiento de los contaminantes en función de las condiciones meteorológicas locales. Conocer la dirección y velocidad del viento, así como la humedad y temperatura, ayuda a determinar cómo y hacia dónde se dispersan las emisiones generadas por las pollerías, y en qué momentos del día o del año el riesgo de contaminación es mayor. Esta información es clave para definir el tipo de sistema de purificación más adecuado, su ubicación estratégica y el momento óptimo de operación, garantizando así una mayor

eficiencia en la reducción de contaminantes y una mejor protección de la salud pública.

Los resultados muestran que las pollerías presentan la mayor acumulación de material particulado, con diferencias de peso de hasta 0.44 g, debido probablemente a las emisiones generadas por la cocción constante. Le siguen el colegio, con acumulaciones moderadas vinculadas al tránsito cercano, y las viviendas, donde también se detecta presencia de partículas, especialmente en Vivienda 3, posiblemente por su ubicación o menor ventilación. Estos hallazgos evidencian la necesidad de aplicar medidas de control en espacios con alta actividad y exposición a fuentes emisoras, priorizando ambientes de preparación de alimentos y zonas residenciales vulnerables.

La concentración de cadmio (Cd) en el aire, medida en seis puntos de muestreo (P1 a P6), se encuentra muy por debajo del Estándar de Calidad Ambiental (ECA) para aire en Perú, cuyo límite es de 0.09 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Todas las muestras están dentro de rangos seguros, con valores que oscilan entre 0.0108 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (P6) y 0.0304 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (P1), representando entre 12% y 34% del ECA. Sin embargo, la muestra P1 destaca por tener la concentración más alta, casi el triple que la más baja, lo que indica una diferencia significativa respecto a los demás puntos evaluados. Este valor más elevado se explica por la ubicación de P1: una pollería cuya chimenea se encuentra instalada en la azotea, lo que facilita la emisión directa de gases y metales pesados como el cadmio al ambiente. Este resultado sugiere que las emisiones de actividades culinarias intensivas, como las de pollerías, pueden influir en la calidad del aire local. Por ello, se recomienda realizar un monitoreo específico y frecuente en zonas con presencia de chimeneas activas, así como considerar la implementación de filtros u otras medidas de control. A pesar de esta diferencia, ninguna de las muestras supera el límite normativo, lo que indica que la calidad del aire respecto al cadmio aún es aceptable en el área evaluada.

Los resultados obtenidos mediante espectrofotometría de absorción atómica con llama indican que la presencia de plomo (Pb) en el material particulado sedimentado es baja, con solo tres de seis muestras (P8, P11 y P12) mostrando concentraciones detectables. La muestra P8 presentó la concentración más alta (0.0118 mg/L). No obstante, al convertir estos valores a unidades del Estándar de Calidad Ambiental (ECA) para aire ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), ninguna de las muestras supera el límite de 1.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, siendo la concentración más alta equivalente a solo el 3% del valor permitido.

Las otras muestras presentaron concentraciones negativas o no detectables, atribuidas a niveles por debajo del límite de detección del equipo. La precisión de los datos es alta, evidenciada por los bajos valores de desviación estándar relativa ($\text{RSD} < 5\%$). En conjunto, los resultados sugieren que la calidad del aire en las zonas evaluadas no representa un riesgo por exposición a plomo, aunque se recomienda mantener el monitoreo continuo para detectar posibles variaciones temporales o espaciales en la concentración de este metal.

VI. RECOMENDACIONES

Se recomienda la instalación obligatoria o incentivada de sistemas purificadores en las chimeneas de pollerías, utilizando filtros elaborados con materiales de bajo costo y alta eficiencia, como el carbón activado de bagazo de caña de azúcar. Este tipo de filtro ha demostrado una capacidad notable para reducir el color, olor, densidad y permanencia del humo, disminuyendo así la emisión de material particulado y contaminantes gaseosos al ambiente urbano. Además de ser sostenible, esta tecnología puede adaptarse a las condiciones económicas de pequeños negocios. Ante la evidencia de emisiones contaminantes significativas desde negocios como las pollerías, se recomienda que las municipalidades implementen normativas locales que exijan el uso de filtros o tecnologías de mitigación, además de la evaluación periódica de emisiones. Estas normativas deben estar alineadas con el ECA para aire.

Para fortalecer la validación de los sistemas purificadores y conocer en profundidad la composición del aire contaminado, se recomienda complementar las simulaciones con análisis de laboratorio que incluyan compuestos como CO, NOx, COVs y metales pesados como Pb y Cd. Estos datos son fundamentales para establecer la eficiencia real de los sistemas en condiciones operativas reales y definir mejoras técnicas. Es importante llevar a cabo campañas educativas dirigidas a la población local, especialmente en zonas residenciales expuestas, para que comprendan los riesgos para la salud asociados a contaminantes como el PM2.5 y los metales pesados. Estas campañas deben incluir consejos prácticos para reducir la exposición, como evitar actividades al aire libre en horarios críticos o usar plantas filtradoras naturales en el hogar.

Para aumentar la eficiencia, durabilidad y sostenibilidad del sistema purificador desarrollado, se recomienda implementar mejoras técnicas en el diseño del prototipo. En primer lugar, se sugiere reemplazar el tubo de PVC por un tubo de aluminio, debido a su mayor resistencia térmica y mecánica, lo cual lo hace más adecuado para soportar temperaturas elevadas generadas por la combustión. Asimismo, se propone incorporar un panel solar como fuente de energía para alimentar el ventilador del sistema, reduciendo el consumo eléctrico convencional y haciendo el prototipo más autosuficiente y ecológico. Además, se plantea integrar un módulo Arduino que permita automatizar el encendido del ventilador mediante sensores de temperatura, humo o gas, lo que optimizaría el uso del sistema y aumentaría la seguridad operativa. Estas mejoras harían del prototipo una herramienta más robusta, funcional y viable para su aplicación en escenarios reales, especialmente en negocios como pollerías ubicadas en zonas urbanas densamente pobladas.

Dado que se identificó una concentración más alta de cadmio en las inmediaciones de una pollería (P1), se sugiere promover la instalación de filtros de partículas y sistemas de extracción con tratamiento adecuado en establecimientos que utilicen combustión como método de cocción, a fin de reducir la emisión de metales pesados al aire. Además, a pesar de que las concentraciones de cadmio (Cd) y plomo (Pb) se encuentran dentro de los límites establecidos por la normativa peruana, se

recomienda implementar un programa de monitoreo ambiental continuo en las zonas donde se detectaron concentraciones más elevadas, como el punto P1 (cadmio) y el punto P8 (plomo), para identificar tendencias y posibles incrementos a lo largo del tiempo.

REFERENCIAS

- [1] I. J. Lizarraga-Isla, J. E. Pomalaya-Valdez, L. F. Suarez-Salas, y Y. Bendezu-Roca, “Dispersión de material particulado 2.5 emitido por pollerías usando el modelo AERMOD en Huancayo Metropolitano, Perú,” *DYNA*, vol. 86, no. 211, pp. 346–353, 2019. <https://doi.org/10.15446/dyna.v86n211.78812>
- [2] K. R. Cruz López, J. L. López Chávez, y K. A. Saldaña López, *Disminución de CO mediante un filtro de monolito de carbón de las emisiones generadas por pollerías del centro histórico de Trujillo*, Tesis de grado, Univ. César Vallejo, 2018. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/32023>
- [3] N. Robles Sulca, “Calidad del aire en interior de viviendas, contaminadas por la emisión de material particulado de pollerías ubicadas en el centro histórico de Huamanga – 2021,” Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, 2023. <http://repositorio.unsch.edu.pe/handle/UNSCHE/6099>
- [4] A. I. Lozano, “Formulación de propuesta de lavado de gases de combustión en las emisiones de las chimeneas de pollerías de la ciudad de Trujillo, Perú,” Tesis de maestría, Univ. Nacional de Trujillo, Trujillo, Perú, 2016. <https://hdl.handle.net/20.500.14414/7847>
- [5] M. F. ElSharkawy y O. A. Ibrahim, “Impact of the Restaurant Chimney Emissions on the Outdoor Air Quality,” *Atmosphere*, vol. 13, no. 2, p. 261, 2022. <https://doi.org/10.3390/atmos13020261>
- [6] M. Mosquera Montiel y E. J. Peña Gutiérrez, “Diseño de un sistema de filtro en chimeneas de 15 cm de diámetro para la reducción de emisiones de monóxido de carbono (CO) y emisiones de material particulado PM10,” Trabajo de grado, Univ. Francisco de Paula Santander, 2021. <https://url-de-la-tesis-si-estuviera-disponible>
- [7] M. Amir and M. Ali, “Biomass activated carbon air filter for particulate removal”, p, vol. 70, no. 4, pp. 266–277, Apr. 2025. <https://doi.org/10.14314/polimery.2025.4.5>
- [8] C. Rodríguez Jiménez, J. F. Guerra Sanchinelli, J. L. Aguilar Torres, y R. L. Toledo Linares, «Reducir sostenible de emisiones de CO2 elaborado con fibra de coco “ECO2 FILTER”», *IPSUMTEC*, vol. 6, n.º 5, pp. 1–9, sep. 2023. <https://doi.org/10.61117/ipsumtec.v6i5.197>
- [9] Ministerio del Ambiente (MINAM), “0011-2023-MINAM,” Normas Legales, Perú. <https://www.gob.pe/institucion/minam/normas-legales/4880911-0011-2023-minam>
- [10]Y. N. J. Machaca Rivera y E. A. Flores Yufra, “Evaluación de los contaminantes del aire generados por la combustión de carbón vegetal en hornos de pollerías en la ciudad de Tacna,” 2024. <http://hdl.handle.net/20.500.12969/3561>
- [11]R. H. Manzanares Flores, “Determinación de la concentración de partículas atmosféricas sedimentables en función a las características socio-ambientales de la ciudad de Puno,” Tesis, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental, Univ. Privada de Salud Camino, Puno, Perú, 2020. <http://repositorio.upsc.edu.pe/handle/UPSC/737>
- [12]E. Diaz-Nigenda, W. Vázquez-Morales, A. Venegas-Sandoval, H. Morales-Iglesias, y S. Hernández-Jiménez, “Emisiones generadas por el consumo de leña y carbón en la preparación de comida rápida,” *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, vol. 8, no. 2, p. e2962, ene. 2022. <https://doi.org/10.19136/era.a8n2.2962>
- [13]K. Vera Guerrero, M. Zapata Melgar, A. Nomberto, y B. D. Pasco Barriga, “Niveles de concentración de material particulado en el aire en Lima Metropolitana: Un estudio teórico,” *Revista de Ciencias Sociales y Sostenibilidad*, vol. 1, no. 1, pp. 80–103, jun. 2022. <https://doi.org/10.56111/recsys.2021.v1.n1.p80-103>
- [14]C. O. Tord, “Exposición personal a PM2.5 según los medios de transporte utilizados en la ciudad de Lima,” Tesis Doctoral, Universidad Peruana Cayetano Heredia, Lima, Perú, 2021. <https://hdl.handle.net/20.500.12866/10047>