

Instituto Tecnológico de Costa Rica
Vicerrectoría de Investigación y Extensión
Dirección de Proyectos
Informe final de proyectos de investigación y extensión

Valoración de las propiedades magnéticas en bioindicadores y en polvo urbano, como método alternativo para monitorear la contaminación atmosférica en zonas de flujo vehicular

Guillermo Calvo Brenes
Teresa Salazar Rojas
Freddy Araya Rodríguez

Marzo 1, 2023

Tabla de contenidos

Resumen.....	3
Introducción.....	3
Marco Teórico	5
Problemática de la contaminación del aire	6
Monitoreo existente	6
Uso de Biomonitores.....	7
Propiedades magnéticas	8
Metodología.....	9
Generalidades	9
Determinación de densidad vehicular.....	9
Primer año de muestreos	9
Selección de puntos de muestreo	9
Monitores de calidad	10
Segundo año de muestreos	11
Selección de puntos de muestreo	11
Monitores de calidad	11
Secado y tamizado del material vegetativo.....	12
Secado y tamizado del polvo urbano	12
Metales pesados	12
Mediciones magnéticas del material vegetal.....	13
Mediciones magnéticas en polvo urbano.....	13
Análisis estadístico	13
Generación del modelo predictor con respecto a mediciones magnéticas.....	14
Evaluación del grado de correlación para polvo urbano y los biomonitores	14
Metodología para la medición de contaminantes atmosféricos por métodos magnéticos ...	14
Discusión y Resultados	15
Primer año de muestreo	15
Segundo año de muestreo	17
Conclusiones	21
Recomendaciones	22
Agradecimientos	22
Bibliografía.....	22

Valoración de las propiedades magnéticas en bioindicadores y en polvo urbano, como método alternativo para monitorear la contaminación atmosférica en zonas de flujo vehicular

**Dr. Guillermo Calvo Brenes, coordinador del proyecto, gcalvo@itcr.ac.cr.
MSc. Teresa Salazar Rojas, estudiante de doctorado, nquiros@itcr.ac.cr
Dr. Freddy Araya Rodríguez, faraya@itcr.ac.cr**

Resumen

La contaminación atmosférica es uno de los problemas ambientales más serios a nivel mundial debido a sus efectos adversos en la salud pública. En Costa Rica, la mayoría de las emisiones contaminantes se debe a la creciente flota vehicular, que contienen partículas finas (PMs) y metales pesados (MPs). Los MPs son bioacumulables y no biodegradables. Varios de los contaminantes emitidos poseen propiedades magnéticas, cuya medición representa un mecanismo rápido alterno y de bajo costo para el monitoreo de la contaminación del aire. Los MPS se depositan en el suelo, polvo urbano o en material vegetal. El objetivo del proyecto fue generar una metodología novedosa fundamentada en las propiedades magnéticas en biomonitores y polvo urbano, como método alternativo para monitorear la contaminación atmosférica en zonas de flujo vehicular. Se seleccionaron muestras de hojas de un cítrico, laurel de la India, ciprés, casuarina; y polvo urbano, por un período de 2 años, en diferentes zonas, para analizar su contenido de metales pesados (hierro, cobre, plomo, cromo, níquel, vanadio, zinc y cadmio) por métodos químicos tradicionales y sus propiedades magnéticas. Posteriormente se determinó estadísticamente las posibles correlaciones entre los MPs y las respectivas mediciones magnéticas. Se encontraron correlaciones estadísticamente significativas entre las propiedades magnéticas y las sustancias químicas de las plantas estudiadas, para todos los MPs, excepto cadmio. Se confirmó que los análisis magnéticos se pueden utilizar para distinguir diferentes grados de contaminación del aire urbano.

Palabras clave: Propiedades magnética, biomonitores, metales pesados, contaminación atmosférica, flujo vehicular

Introducción

La contaminación atmosférica constituye uno de los principales problemas en las áreas urbanas y la exposición humana a largo plazo al aire contaminado generalmente se relaciona

con una variedad de resultados para la salud, como infecciones respiratorias, enfermedades cardíacas y cáncer de pulmón (WHO, 2021). El material particulado (PM, por sus siglas en inglés) que se encuentra suspendido en el aire, es uno de esos contaminantes y los más pequeños en tamaño ($PM_{2.5}$) pueden causar lesiones cardiopulmonares y difusión sistémica (Lee et al., 2019; Losacco & Perillo, 2018; Polezer et al., 2018). El PM está relacionado principalmente con las actividades industriales, la fabricación de materiales de construcción y las emisiones del tráfico y, en ausencia de actividades industriales, la principal fuente de PMs son las emisiones de los vehículos (Aguilar-Reyes et al., 2012; Cejudo-Ruíz et al., 2015). Las emisiones de los vehículos generan gases de efecto invernadero, PM_{10} , $PM_{2.5}$, así como metales pesados (MPs), tales como cromo, cobre, níquel, plomo, vanadio, hierro y zinc, provenientes de la combustión de combustibles, el desgaste de los motores de los vehículos y la abrasión de los frenos (Adachi & Tainosho, 2004; Ojekunle et al., 2015); además, las partículas suspendidas en el aire son portadoras ricas de MPs (Sharma et al., 2020).

En Costa Rica, la mayoría de las emisiones contaminantes se debe a la flota vehicular, la cual crece anualmente. Resultado de esta contaminación atmosférica es la presencia de partículas finas en el aire que representan un alto riesgo para la salud, como lo son las enfermedades cardiovasculares y respiratorias. También, se han encontrado presencia de metales pesados, algunos de los cuales son altamente tóxicos para el ser humano. Los niveles de partículas en suspensión ($PM_{2.5}$) registrados en algunas áreas del Gran Área Metropolitana (GAM) de Costa Rica, superan las normas anuales establecidas por la Organización Mundial de la Salud y la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, mayoritariamente en sitios industriales y comerciales de alto flujo vehicular (Briceño-Castillo et al., 2016.).

En el país existen algunos sitios establecidos de muestreo, que forman parte de una red de monitoreo de la calidad del aire de la GAM, con mediciones periódicas manuales de 24 horas. Sin embargo, este tipo de análisis químico tradicional resulta costoso y las estaciones de monitoreo se están reduciendo en número. La investigación de mecanismos alternos rápidos y de bajo costo, para monitorear los niveles de contaminación, tanto de aire como en polvo urbano, debe ser uno de los objetivos que se proponga la comunidad científica y las instituciones gubernamentales respectivas.

Las técnicas magnéticas han mostrado ser una alternativa de bajo costo para medir en forma indirecta el contenido de partículas PM_{10} , $PM_{2.5}$ y contenido de metales pesados; tanto en suelo, polvo urbano y aire; además de poder diferenciar entre los que son de origen antropogénico como los de tipo geológico (Salazar-Rojas et al., 2023).

Dado que la determinación del contenido de MPs mediante análisis químicos frecuentes es muy costosa, el uso de técnicas proxy se ha vuelto de mayor interés últimamente. Una de estas técnicas relaciona el contenido de MPs ambientales con mediciones de parámetros magnéticos, con procedimientos de buena precisión, económicos y fáciles de realizar. El método proxy magnético se basa en el hecho de que cada material en la tierra exhibe un comportamiento magnético diferente (Cejudo-Ruíz et al., 2015).

Por otra parte, las plantas han demostrado que son eficientes recolectores de contaminantes dispersos en el aire, reduciendo la contaminación ambiental. Por lo tanto, el empleo de plantas (biomonitores) como muestreadores pasivos, ha resultado eficaz para evaluar la calidad del aire, convirtiéndose también en un método de bajo costo (Muñoz et al., 2017). Igualmente, el uso de polvo urbano y suelo han mostrado ser también buenos muestreadores pasivos.

Este estudio tuvo como objetivo llevar a cabo un monitoreo del contenido de MPs en diferentes partes de la Gran Área Metropolitana de Costa Rica, utilizando inicialmente *Cupressus lusitanica* (Cupressaceae), *Citrus* (Rutaceae) y *Ficus benjamina* (Moraceae) como biomonitores y también polvo de carretera. Posteriormente los biomonitores fueron sustituidos por *Cupressus lusitanica* y *Casuarina equisetifolia*, una vez analizados los resultados iniciales. Esos árboles están ampliamente distribuidos en las principales ciudades de Costa Rica. Los sitios de muestreo seleccionados para nuestra investigación fueron aquellos que solo están muy afectados por el tráfico sin actividades industriales y agrícolas en los alrededores. Otro objetivo fue evaluar la relación entre el contenido de MPs encontrado en los monitores de calidad del aire utilizados en esta investigación y sus propiedades magnéticas. El uso de propiedades magnéticas como método proxy ha mostrado resultados alentadores; sin embargo, se ha observado que las relaciones entre el contenido de PMs y los parámetros magnéticos son diferentes para cada ciudad, de ahí la importancia de evaluar su comportamiento en nuestras ciudades.

Este proyecto, se enmarca en el área de investigación de la Escuela de Química, las líneas prioritarias de investigación de la institución de Habitat y Salud y es congruente con la política general y específicas 2.1.1; 2.1.2 y 2.1.6.

El proyecto forma parte de una tesis doctoral y las mediciones magnéticas se llevarán a cabo en el Laboratorio Universitario de Geofísica de la UNAM en Michoacán, México que cuenta con el equipo especializado que no existe en el país. Igualmente se contará con vasta experiencia de investigadores mejicanos que ya han trabajado en esta área y colaborarán con el análisis y la interpretación de los resultados.

Marco Teórico

Tres de las mayores tendencias económicas de las últimas décadas han sido el crecimiento poblacional, industrial y urbanístico. Estas tendencias han traído consecuencias importantes en el balance de los diferentes ecosistemas tales como pobreza, agotamiento de recursos, cambio climático, contaminación de agua, suelos y aire (Calvo-Brenes, 2015; Perera, 2018). Por otro lado, el crecimiento y expansión de las ciudades ha provocado un aumento en la cantidad de personas que deben trasladarse diariamente a sus sitios de trabajo. También,

la industrialización ha generado un aumento de las emisiones de contaminantes afectando de manera importante la calidad del aire (Briceño-Castillo et al., 2016)

Contaminación del aire

El crecimiento poblacional y urbanístico ha llevado a un crecimiento en la flota vehicular, que es responsable por el 22-25% de las emisiones de gases de efecto invernadero y un decrecimiento en la salud pública, por contribuir a enfermedades respiratorias y la diversificación de contaminantes ambientales (Ramos, 2016). Así la Organización Mundial de la Salud (OMS) estima que a nivel mundial alrededor de 1500 millones de personas viven en áreas con niveles peligrosamente elevados de contaminación del aire y que esa exposición de las personas produce la muerte de 7 millones de personas por año (WHO, 2021).

Los PMs están relacionados principalmente con las actividades industriales, la fabricación de materiales de construcción y las emisiones del tráfico y, en ausencia de actividades industriales, la principal fuente de PMs son las emisiones de los vehículos (Cejudo-Ruiz et al., 2015; Muñoz et al., 2017). El uso de combustibles fósiles en países de ingresos altos y medianos y la quema de biomasa en países de bajos ingresos representan el 85 % de todas las partículas producidas (Perera, 2018). Los combustibles fósiles y su uso en el transporte son cada vez más preocupantes debido al aumento desmesurado del número de vehículos en todo el mundo. El crecimiento de la producción de 2000 a 2018 fue del 34 % para automóviles y del 128 % para camiones (Davis et al., 2021), lo que provocó una disminución en la salud pública. Las emisiones de los vehículos generan gases de efecto invernadero, PM₁₀, PM_{2.5}, así como metales pesados (MPs), como el cromo (Cr), cobre (Cu), níquel (Ni), plomo (Pb), vanadio (V), hierro (Fe) y zinc (Zn), debido a la combustión de combustibles, el desgaste de los motores de los vehículos y la abrasión de los frenos (Adachi & Tainosho, 2004; Ojekunle et al., 2015); además, las partículas en el aire son portadoras ricas de MPs (Sharma et al., 2020).

En Costa Rica, el incremento en la venta de vehículos se ha mantenido en forma creciente en los últimos años. De acuerdo con Briceño-Castillo y colabores (Briceño-Castillo et al., 2016), los niveles de partículas PM_{2.5} registrados en el Gran Área Metropolitana de Costa Rica, superan las normas anuales establecidas por la Organización Mundial de la Salud y la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, mayoritariamente en sitios industriales y comerciales de alto flujo vehicular. En promedio este tipo de partículas está representando entre el 65-70% de las partículas PM₁₀. Asimismo, determinaron que los promedios de concentración de partículas PM₁₀, resultaron ser mayores para los sitios ubicados en zonas de alto flujo vehicular e industrial (32-54 µg/m³), que para aquellos sitios de transición entre zonas comerciales y residenciales (20-26 µg/m³) (Briceño-Castillo et al., 2016).

Monitoreo existente

A nivel mundial la implementación de estaciones de monitoreo en áreas urbanas es reducida debido su alto costo de inversión y de mantenimiento (Wilson et al, 2005). Asimismo, se

debe tomar en cuenta que, una vez recolectadas las muestras, estas deberán de ser analizadas, lo cual conlleva a costos económicos y generación de contaminación, cuando los métodos utilizados son químicos, tanto por las técnicas espectroscópicas cuyos equipos y mantenimiento son costosos y por el vertimiento de desechos de sustancias químicas, algunas muy contaminantes del medio.

En el país existen algunos sitios establecidos de muestreo, que forman parte de una red de monitoreo de la calidad del aire de la GAM, con mediciones periódicas manuales de 24 horas con equipos muestreadores de aire de alto volumen y equipos portátiles autónomos con batería para muestras de aire de bajo volumen. En la captura de las partículas con muestreadores de alto volumen, se utilizan filtros de fibra de vidrio y filtros de cuarzo (Briceño-Castillo et al., 2016).

Uso de Biomonitores

Las plantas han demostrado ser efectivas en la reducción de las PMs, por lo que actúan como colectores pasivos de material particulado (Muñoz et al., 2017). El uso de plantas como biomonitores para la identificación de la contaminación en los diferentes medios, agua, suelo y aire ha sido de amplio uso en muchos estudios (Kardel et al., 2018; Ojekunle et al., 2015; Stankovic et al., 2014).

El biomonitoreo permite establecer el impacto de la contaminación sobre los seres vivos en el ambiente, a diferencia de los métodos tradicionales que solo evalúan su parte abiótica (aire, agua, suelo); además, el monitoreo convencional del ambiente urbano e industrial requiere de técnicas cada vez más costosas y complejas, por lo cual se hace necesario el uso de mecanismos alternativos que permitan obtener información relevante a precios más accesibles (Markert et al., 2003).

La eficacia de la absorción foliar de las plantas sobre las partículas en el aire depende de la estructura foliar, el tamaño de las partículas, la carga y la composición, además de las características morfológicas de las plantas. Existen diferencias sustanciales en el contenido de MPs y PMs atmosféricos en relación con los cambios estacionales, como la temperatura, la precipitación y la humedad, así como el tipo y la frecuencia de las actividades antropogénicas, lo cual está ligado al sitio de muestreo en cuestión (Sharma et al., 2020). Por lo tanto, es necesario recopilar una base de datos de referencia de los contaminantes en el aire en diferentes sitios locales y nacionales.

Existen algunas especies que son capaces de capturar los MPs a las paredes celulares o introducirlos en las vacuolas o acomplejarlos con ácidos orgánicos o sufren adaptaciones enzimáticas que les permiten realizar sus funciones en presencia de cantidades elevadas de metales. Así dentro de la clasificación de las plantas existen las del tipo *indicadoras* que pueden reflejar el incremento de metal producido en el entorno. Asimismo, existen las *acumuladoras* que incrementan activamente metales en sus tejidos (Sharma et al., 2020).

Propiedades magnéticas

Investigadores internacionales han demostrado que el material particulado (PM_{10}) en el aire contienen óxidos metálicos y otros metales pesados, cuya fuente principal son las emisiones de los vehículos (Muñoz et al., 2017). De hecho, el material particulado atmosférico (PMs) es considerado un excelente transportador de MPs como Zn, Fe, Pb, Ni, etc., como se desprende de una investigación realizada (Sharma et al., 2020).

La presencia de este tipo de óxidos de hierro, así como otros tipos de metales presentes en las partículas en suspensión, poseen propiedades magnéticas que pueden ser medibles cuantitativamente y están relacionadas con la concentración de esos metales (Cejudo-Ruíz et al., 2015; Li et al., 2017).

En la actualidad, esta técnica alternativa que está tomando auge es la magnetización de ciertos bioindicadores correlacionada a la contaminación del aire. El método magnético es más rápido, exacto, de bajo costo y no destructivo, en comparación con los métodos químicos tradicionales (Leng et al., 2018; Li et al., 2017).

La relación que existe entre la distribución del polvo ambiental que contiene material participado magnético y las propiedades magnéticas de varias hojas de especies es motivo de recientes estudios; *Platanus* sp. and *Quercus ilex*, Pine, lime (*Tilia platyphyllos*), *Ficus benjamina* (Salazar-Rojas et al., 2023). También ha sido demostrado que los parámetros magnéticos pueden ser utilizados como un indicador directo del nivel de contaminación en el polvo ambiental, debido a que partículas magnéticas pueden ser asociadas a contaminantes metálicos como Cu, Cr, Zn and Pb (Leng et al., 2018).

Asimismo, en un estudio realizado por Cejudo (2015), en la ciudad de México determinó que, por medio de los parámetros magnéticos, es posible identificar suelos con alta concentración de material magnético, o material particulado de fracción fina ($PMs < 0.03 \mu m$) cuyo origen podría ser antrópico. Además, estos parámetros magnéticos pueden mantener una relación con la concentración de ciertos EPT (elementos potencialmente tóxicos), aunque se determinó que esta relación depende del tipo de ambiente geológico en donde se encuentre el suelo (Cejudo-Ruíz et al., 2015; Sharma et al., 2020).

El objetivo de la presente investigación es generar un método alternativo para monitorear la contaminación atmosférica en zonas de flujo vehicular basado en las propiedades magnéticas de bioindicadores y polvo urbano, el cual consiste en determinar en los medios mencionados los parámetros de susceptibilidad magnética (χ), en dos tipos de frecuencia, así como la determinación del contenido de MPs (Cr, Cu, Ni, Pb, V y Zn)

Metodología

Generalidades

En este proyecto se utilizaron biomonitores, los cuales pueden ser especies vegetales, hongos o animales, para evaluar características ecológicas del medio o sobre el impacto causado por ciertas prácticas en el medio. Actúan como muestreadores pasivos almacenando contaminantes atmosféricos en algún componente morfológico de su estructura.

Se investigaron las posibles correlaciones que existan entre diferentes variables como son los metales pesados, tipo de monitor de calidad utilizado, densidad vehicular y las propiedades magnéticas. Además de hojas de plantas, también se evaluó el contenido de MPs en muestras de polvo urbano con el fin de determinar posible correlación con la contaminación atmosférica.

El tiempo de muestreo total fueron 2 años; sin embargo, primeramente, se muestreó por un año y se analizaron los resultados obtenidos, con el fin de determinar si había necesidad de replantear tanto los puntos de muestro como el tipo de monitores que se utilicen.

Determinación de densidad vehicular

Se investigarán bases de datos en instituciones gubernamentales, principalmente del Ministerio de Obras Públicas y Transportes, sobre densidad vehicular (DV) en distintas zonas del GAM. Interesa información de DV cercana a los puntos de muestreo.

Objetivo Específico 1: Determinar las propiedades magnéticas y el contenido de metales pesados, tanto en polvo urbano como en diversos bioindicadores, en distintas zonas del GAM por métodos de espectroscopía de Absorción Atómica (AA), magnetómetros y medidores de susceptibilidad magnética.

Primer año de muestreos

Selección de puntos de muestreo

El estudio se llevó a cabo dentro del GAM donde vive el 50% de la población del país considerando la densidad vehicular (número de vehículos/día). También se hizo un inventario de los distintos tipos de arbustos y árboles en cada zona con el apoyo de un experto en plantas del Instituto Tecnológico de Costa Rica y que abarcó un aproximado de 50 diferentes tipos de plantas.

Se seleccionaron 5 puntos de muestreo de alta densidad vehicular, pero manteniendo diferencias numéricas entre ellos. Estos puntos fueron: la Universidad Técnica Nacional (UTN) en Alajuela, la Riviera de Belén en Heredia, Ochomogo por Recope, Cartago, Hatillo en San José y Coronado en San José.



Figura 1. Puntos de muestreo seleccionados en el primer año de muestreos.

Monitores de calidad

Se seleccionaron 3 especies de plantas como biomonitores, considerando criterios de abundancia, accesibilidad, longevidad, características morfológicas de las hojas que se consideren óptimas para la captura y retención de contaminantes. Para esta labor de reconocimiento de las plantas, se contó con la colaboración de un experto de la escuela de Ingeniería Forestal del Instituto Tecnológico de Costa Rica (ITCR). Los biomonitores seleccionados fueron: el ciprés (*Cupressus lusitanica*), el limón agrio (género *Citrus*) y el laurel de la India (*Ficus benjamina* L.). La selección de estos biomonitores se basó en estudios previos hechos por la comunidad científica y reportados en la literatura. Otro criterio empleado fue que cada biomonitor seleccionado debía estar presente en cada uno de los 5 sitios de muestreo previamente seleccionados.

Se recolectaron muestras de hojas de plantas durante dos campañas de febrero a marzo una en 2020 y otra en 2021. Se tomó follaje maduro del dosel lateral frente al borde de la carretera, entre 1 y 5 plantas por sitio, a una altura de 1.5 a 2,0 m, considerando la altura normal de la respiración humana y para evitar la influencia de las partículas del suelo urbano. Las muestras se almacenaron en bolsas de plástico y se transfirieron a una nevera portátil. En laboratorio, las muestras fueron secadas a (55 ± 1) °C hasta peso constante y luego tamizadas, para su posterior análisis en laboratorio, de acuerdo a las recomendaciones de Aguilar-Reyes et al. (Aguilar-Reyes et al., 2012).

Las muestras de polvo de carretera se recolectaron en los mismos sitios de muestreo y período de tiempo de las plantas. Las muestras se recogieron en la vía y se realizó un barrido de aproximadamente un metro cuadrado hasta el borde de la vía. Las muestras de polvo de la

carretera se almacenaron en bolsas de plástico y se transfirieron a una nevera portátil. En el laboratorio, las muestras fueron secadas a temperatura ambiente y luego tamizadas para su posterior análisis en el laboratorio siguiendo a Reyes-Aguilar et al. (Aguilar-Reyes et al., 2012).

Segundo año de muestreos

Selección de puntos de muestreo

Se seleccionaron 8 puntos de muestreo ubicados en el GAM que contemplaran densidades vehiculares más amplias a las seleccionadas en el primer año de muestreo, desde los 0 vehículos diarios por punto de muestreo hasta los 104 558 vehículos diarios.



Figura 2. Puntos de muestreo seleccionados en el segundo año de muestreos.

Fuente: (Salazar-Rojas et al., 2023)

Los datos de densidad vehicular de cada uno de estos puntos se pueden consultar en artículo publicado recientemente: Salazar-Rojas, T., Cejudo-Ruiz, F.R. y Calvo-Brenes, G. Assessing magnetic properties of biomonitors and road dust as a screening method for air pollution monitoring. *Chemosphere* 310 (2023), 136795

Monitores de calidad

Las especies vegetales fueron seleccionadas, luego de realizar un censo en enero de 2020, considerando criterios de abundancia, accesibilidad, longevidad, cercanía a la vía y resultados obtenidos en un estudio preliminar. Los biomonitores seleccionados fueron:

Cupressus lusitanica (Cupressaceae) y *Casuarina equisetifolia* (Casuarinaceae), ambas perennes, con una duración de follaje de 2 años o más.

Se recolectaron 160 muestras de hojas de plantas durante dos campañas de febrero a marzo una en 2020 y otra en 2021. Se tomó follaje maduro del dosel lateral frente al borde de la carretera, entre 1 y 5 plantas por sitio, a una altura de 1.5 a 2,0 m, considerando la altura normal de la respiración humana y para evitar la influencia de las partículas del suelo urbano. Las muestras se almacenaron en bolsas de plástico y se transfirieron a una nevera portátil. En laboratorio, las muestras fueron secadas a (55 ± 1) °C hasta peso constante y luego se tamizaron para su posterior análisis en laboratorio, de acuerdo a las recomendaciones de Aguilar-Reyes et al. (Aguilar-Reyes et al., 2012).

Se recolectaron 80 muestras de polvo de carretera en los mismos sitios de muestreo y período de tiempo de las plantas. Las muestras se recogieron en la vía y se realizó un barrido de aproximadamente un metro cuadrado hasta el borde de la vía. Las muestras de polvo de la carretera se almacenaron en bolsas de plástico y se transfirieron a una nevera portátil. En el laboratorio, las muestras fueron secadas a temperatura ambiente y luego tamizadas para su posterior análisis en el laboratorio siguiendo a Reyes-Aguilar et al. (Aguilar-Reyes et al., 2012).

Secado y tamizado del material vegetativo

Las hojas serán pesadas y secadas en un horno a 50 °C por espacio de 48 horas, pesadas nuevamente y secadas por un período de 24 horas para asegurar la remoción total del agua, a través de la verificación de la obtención de peso constante. Finalmente, fueron molidas con un molino y tamizadas, para luego ser almacenadas al vacío (Aguilar-Reyes et al., 2012).

Secado y tamizado del polvo urbano

Las muestras de polvo urbano fueron pesadas y secadas en un horno a 50 °C por espacio de 48 horas, pesadas nuevamente y secadas por un período de 24 horas para asegurar la remoción total del agua, a través de la verificación de la obtención de peso constante. Luego se pasaron por un tamiz, para luego ser almacenadas al vacío (Aguilar-Reyes et al., 2012).

Metales pesados

Los metales pesados seleccionados para el análisis de su contenido en los monitores de calidad fueron el: Cr, Cu, Ni, Pb, V, Zn, Cd y Fe que son metales contaminantes usualmente presentes en el aire. La metodología de análisis del contenido de metales pesados fueron los establecidos en el Standard Methods for the Examination of Waters and Wastewaters (APHA, AWWA and AEF, 2017) Las mediciones de contenido de metales pesados fueron llevadas a cabo en un espectrofotómetro de Absorción Atómica Shimatzu, con el apoyo de un horno de grafito y un generador de hidruros, para la determinación de concentraciones a nivel de trazas en el CEQIATEC.

Mediciones magnéticas del material vegetal

El material vegetal seco y molido se colocó en recipientes cúbicos de PVC (11 cm³) para efectuar las mediciones de las propiedades magnéticas. Esta etapa se llevó a cabo en México al momento de efectuar las mediciones (Aguilar-Reyes et al., 2012). Estas mediciones se llevaron a cabo en el Laboratorio de Magnetismo Natural (LIMNA) de la Universidad Nacional de México (UNAM) del Campus de Morelia.

La susceptibilidad magnética se midió en un Bartington MS2B. Las mediciones consistieron en determinar en los medios mencionados los parámetros de susceptibilidad magnética másica (χ), en dos tipos de frecuencia

Mediciones magnéticas en polvo urbano

El material fue encapsulado en cubos plásticos estándar (11 cm³) en preparación para las mediciones magnéticas. Este encapsulado se efectuó en los laboratorios de la UNAM, Michoacán, México, específicamente en el Laboratorio de Magnetismo Natural (LIMNA) de la Universidad Nacional de México (UNAM) del Campus de Morelia.

La susceptibilidad magnética se midió en un Bartington MS2B en dos tipos de frecuencia.

Objetivo Específico 2: Analizar la relación entre varios contaminantes atmosféricos con relación a sus propiedades magnéticas por métodos estadísticos utilizando el programa de cómputo SPSS y Minitab

Análisis estadístico

Antes de iniciar el análisis estadístico con los datos obtenidos, se verificó el cumplimiento de dos supuestos: la normalidad de la variable dependiente “y” (variable de respuesta) y la homocedasticidad de las varianzas. La normalidad en “y” se probará con el análisis de los residuales e (Acuña-Fernández, 2013) y la homogeneidad de las varianzas se llevará a cabo con la prueba de Levene ($\alpha = 0.05$). En aquellos casos de incumplimiento de alguno de estos supuestos, se recurrirá a la transformación de una o varias variables hasta lograr el cumplimiento de los supuestos. Existe una serie de transformaciones de las variables entre las cuales están las de tipo Y^p donde p es un múltiplo distinto de 0, $\ln(y)$, $Y^{-1/2}$, $Y^{1/2}$ y Y^{-1} , entre otros (Montgomery et al., 2012). El uso de transformaciones en “y” se evaluará usando el programa de cómputo “Statistical Package for Social Science” (SPSS versión 21).

El análisis de posibles correlaciones entre diferentes variables se llevó a cabo utilizando el Coeficiente de Correlación de Pearson con un nivel de confianza del 95% ($\alpha = 0,05$). El programa de cómputo empleado para tal fin fue el Statistical Package for Social Science (SPSS), versión 25.

Los modelos predictivos se llevaron a cabo utilizando Análisis de Regresión Lineal Univariable utilizando el software SPSS y el MINITAB, siendo las variables dependientes cada uno de los metales pesados presentes en plantas y suelo, con respecto a las propiedades magnéticas (variable independiente) (Acuña-Fernández, 2013; Montgomerly et al., 2012).

Objetivo específico 3: Describir la metodología para el análisis de contaminantes atmosféricos a través de la medición de propiedades magnéticas en el objeto de estudio, para promover el uso de mecanismos alternos y de bajo costo.

Generación del modelo predictor con respecto a mediciones magnéticas

La verificación de linealidad entre la variable respuesta y cada una de las variables predictoras, se verificó generando una gráfica matricial que es una herramienta que dispone el programa MINITAB. En aquellos casos que la relación no fuera lineal, se transformarán las variables predictoras con el programa CurveExpert para linealizar la curva.

Posteriormente, con el apoyo del programa SPSS, se generaron modelos de regresión lineal multivariable para cada base de datos con reducción de variables por el método “Stepwise” y “Backward”. La bondad de cada modelo se evaluará analizando los valores del R^2 ajustado.

Evaluación del grado de correlación para polvo urbano y los biomonitores

El grado de correlación se obtuvo por medio del coeficiente de determinación, el cual, entre más cercano sea a 1, representa un mejor ajuste de la curva con relación a los puntos del muestreo.

Metodología para la medición de contaminantes atmosféricos por métodos magnéticos

La selección se llevó a cabo considerando los coeficientes de determinación de cada modelo de correlación. Entre mayor sea este número, mejor es el ajuste de la curva, con respecto a la contaminación atmosférica en cada una de las variables evaluadas.

En los casos en que se hayan establecido correlaciones estadísticamente significativas, se consideraron como métodos válidos para valorar la contaminación atmosférica por métodos magnéticos.

Además, se consideraron otros criterios que el experto considere tomar en cuenta para la selección del biomonitor o biomonitores, como puede ser la abundancia de un bioindicador con respecto a otras menos abundantes.

Discusión y Resultados

Primer año de muestreo

Los datos que se indican en el cuadro 1 muestran los resultados del análisis de contenido de metales pesados en 3 bioindicadores, ubicados en cada uno de los 5 puntos y que corresponden al primer año de muestreos. La densidad vehicular en las zonas de estudio corresponde a valores que van desde los 2180 hasta los 60591 vehículos promedio por día. La concentración de cada metal analizado está expresada en miligramos de metal por gramo de biomonitor (en base seca).

Los valores promedio de las concentraciones de Pb en el material vegetal muestra valores bajos; igual situación muestra el Cr y el Ni, mientras que el Fe fue el metal con las mayores concentraciones.

Cuadro 1. Concentración de metales pesados en 3 distintos biomonitores

Bioindicador	Ubicación	Densidad vehicular (#/día)	Concentración del metal (mg/g)						
			Fe	Cu	Pb	Cr	Ni	V	Zn
Ciprés	Coronado	2180	0.0948	0.0330	0.0000	0.0009	0.0008	0.0012	0.0441
	Alajuela	14993	0.1950	0.0000	0.0000	0.0009	0.0012	0.0041	0.0203
	Belén	21182	0.2834	0.0333	0.0004	0.0017	0.0012	0.0057	0.0267
	Ochomogo	43512	1.2685	0.0000	0.0057	0.0042	0.0012	0.0041	0.0496
	Hatillo	60591	0.0863	0.0247	0.0000	0.0007	0.0019	0.0024	0.0283
Cítrico	Coronado	2180	0.1073	0.0330	0.0000	0.0006	0.0013	0.0044	0.0359
	Alajuela	14993	0.1903	0.0207	0.0017	0.0020	0.0000	0.0031	0.0261
	Belén	21182	0.0946	0.0411	0.0000	0.0005	0.0002	0.0034	0.0378
	Ochomogo	43512	0.2231	0.0000	0.0025	0.0012	0.0023	0.0026	0.0306
	Hatillo	60591	0.1597	0.0246	0.0000	0.0011	0.0009	0.0032	0.0184
Ficus	Coronado	2180	0.2923	0.0329	0.0006	0.0009	0.0008	0.0038	0.0263
	Alajuela	14993	0.1245	0.0166	0.0017	0.0009	0.0010	0.0043	0.0174
	Belén	21182	0.1213	0.0335	0.0000	0.0007	0.0003	0.0029	0.0176
	Ochomogo	43512	0.2089	0.0000	0.0037	0.0009	0.0000	0.0056	0.0292
	Hatillo	60591	0.1075	0.0331	0.0004	0.0006	0.0012	0.0031	0.0252

Fuente: (Salazar-Rojas & Calvo-Brenes, 2019)

El análisis estadístico de Densidad Vehicular con cada uno de los metales evaluados en el Ciprés, indica que no hay correlación entre la Densidad Vehicular con respecto al Fe, Cu, Pb, Cr, V y Zn ($\alpha = 0,05$) cuando el biomonitor fue el Ciprés. En el caso del Ni este si mostró una correlación positiva con la Densidad Vehicular (figura 3) y el nivel de confianza fue de 95,6%.

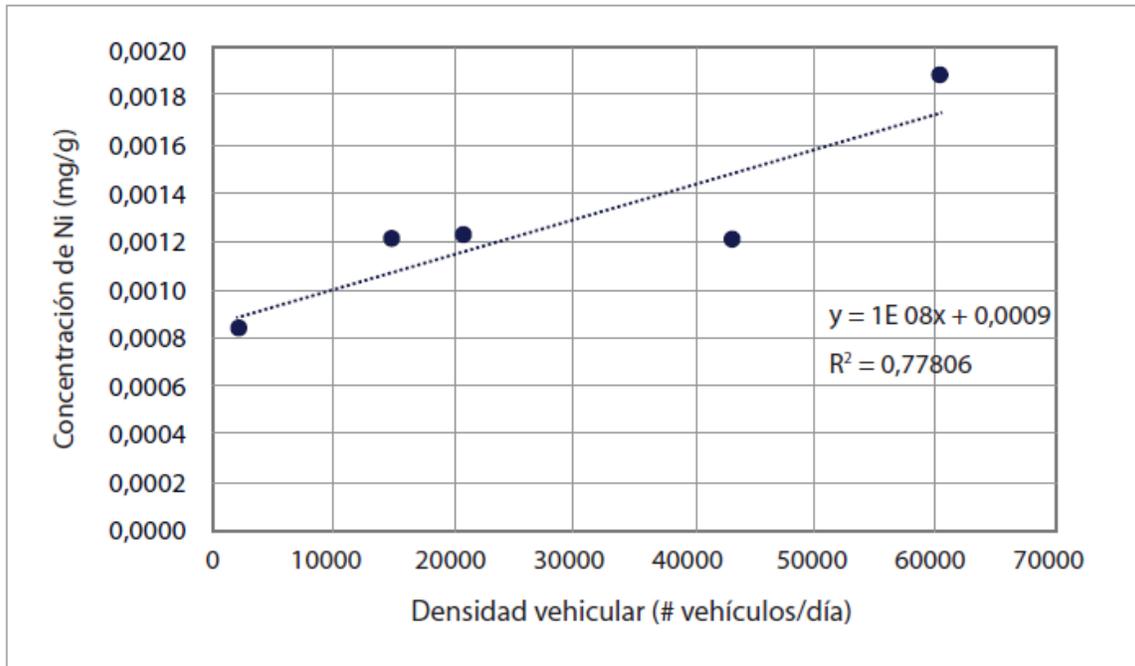


Figura 3. Comportamiento de la concentración de Ni en Ciprés con relación a la densidad vehicular

Fuente: (Salazar-Rojas & Calvo-Brenes, 2019)

En el caso de los metales evaluados en las hojas de Cítricos y Ficus el análisis estadístico mostró que ninguno de los metales tenía una correlación significativa con relación a la densidad vehicular ($\alpha = 0,05$).

En el caso de los MPs en polvo urbano, estos mostraron valores hasta 10 veces más altos que los observados en los biomonitores. Este tipo de comportamiento se debe a que los biomonitores acumulan contaminantes en sus hojas por el período que la hoja está adherida a la planta, lo cual puede ser 1-2 años, mientras que en el polvo la acumulación puede ser por períodos muy largos mientras que el polvo no sea removido de los alrededores de la zona de muestreo. Esto significa que si por las condiciones del medio, el polvo no es removido, este continúa acumulando MPs en forma continua.

De los metales evaluados, el Ni retenido en el Ciprés fue el único que mostró correlación entre su concentración y la Densidad Vehicular. Este comportamiento está sujeto al tipo de biomonitor seleccionado por lo que no se puede descartar que el uso de otros biomonitores no evaluados en esta investigación, pudieran mostrar una correlación mejor con relación a esta variable.

Dada estas circunstancias, para el segundo año de muestreo se optó por usar como biomonitores el ciprés y la casuarina. También se seguiría con el polvo urbano, por ser un monitor de calidad usado con frecuencia por otros investigadores. Asimismo, se variaron los

puntos de muestreo considerando una mayor diferencia en su densidad vehicular entre un punto y otro para mejorar el análisis estadístico.

Segundo año de muestreo

En esta segunda etapa, las muestras fueron analizadas química y magnéticamente, tal como se indica en el cuadro 2. Se detectaron diferentes niveles de concentración para los MPs, excepto el Cd, que presentó concentraciones de 0 mg/Kg en los puntos muestreados (Cuadro 2). Los valores de MPs para el polvo de la carretera son claramente más altos que los de las plantas, comportamiento similar y explicado anteriormente, con niveles de 10 a 100 veces mayor a los encontrados en ambos biomonitores evaluados y dependiendo del MP. En general, no se encontró polvo específicamente sobre la carretera y hubo que muestrearlo cerca de las zanjas, ubicadas al lado de la carretera. Esta situación podría además, afectar los contenidos de MPs en el polvo por la influencia de aguas residuales grises de los hogares y negocios cercanos y las fuentes naturales que se pueden acumular en la zanja al costado del camino (Wang et al., 2019).

Cuadro 2. Contenido de MPs en cada punto de muestreo y por monitor de calidad.

Monitor	Site		Fe (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Cr (mg/kg)	Ni (mg/kg)	V (mg/kg)	Zn (mg/kg)	xlf (10 ⁻⁶ m ³ /kg)	kdf%
<i>C. equisetifolia</i>	1	Media	113	11.85	0.99	0.51	2.07	0.17	7.8	0.0332	8,34
		SD	34	4.26	1.35	0.55	1.80	0.50	12.6	0.0059	5,50
	2	Media	169	7.66	0.16	1.22	4.58	1.18	35.2	0.0499	7,78
		SD	25	2.20	0.50	0.54	2.69	0.86	8.0	0.0054	3,79
	3	Media	368	10.06	1.31	2.07	3.33	2.24	39.3	0.0711	7,95
		SD	71	1.48	0.93	0.61	0.99	0.38	4.1	0.0066	4,35
	4	Media	377	11.00	2.37	1.43	4.68	2.03	34.7	0.0624	6,16
		SD	160	2.25	0.45	0.67	2.13	0.83	15.3	0.0121	4,02
	5	Media	338	19.74	2.84	1.14	2.53	1.70	35.5	0.0651	8,82
		SD	47	6.73	1.66	0.20	1.81	0.24	8.4	0.0086	4,01
	6	Media	945	31.00	2.02	3.77	5.50	6.00	53.5	0.1586	6,65
		SD	268	20.13	1.00	1.76	4.30	1.57	8.6	0.0360	4,67
	7	Media	220	13.13	0.57	0.66	1.08	1.74	27.0	0.0489	5,33
		SD	38	6.49	0.74	0.53	0.86	1.16	17.1	0.0034	3,36
	8	Media	175	10.71	0.25	0.64	2.16	0.35	29.6	0.0443	5,38
		SD	52	4.81	0.52	0.46	1.28	0.68	12.2	0.0049	3,71
<i>C. lusitanica</i>	1	Media	150	12.11	2.44	0.59	2.30	1.84	11.1	0.0390	5,05
		DS	34	6.12	2.50	0.70	1.70	3.70	13.8	0.0089	3,05
	2	Media	590	16.99	2.28	2.21	2.70	7.37	47.4	0.0830	8,42
		DS	107	6.06	0.97	0.22	0.85	1.46	4.6	0.0058	4,26
	3	Media	961	21.68	2.89	2.87	3.12	4.57	70.3	0.1225	5,51
		DS	307	7.77	0.50	0.78	1.00	1.15	9.2	0.0232	2,84

	4	Media	1304	21.52	7.01	2.53	3.99	6.73	55.3	0.1439	5,60
		DS	266	6.50	2.92	1.11	1.23	1.42	7.9	0.0255	4,25
	5	Media	999	20.19	12.94	2.02	2.53	5.81	89.7	0.1172	8,04
		DS	241	8.43	0.00	0.58	0.54	1.81	9.1	0.0161	4,16
	6	Media	344	10.70	1.05	0.84	2.37	6.06	37.4	0.0585	5,60
		DS	99	4.38	0.76	0.45	0.70	1.82	4.0	0.0070	3,19
	7	Media	573	18.61	2.07	2.70	1.52	3.27	61.4	0.0866	5,69
		DS	74	7.54	1.06	0.48	1.10	1.21	5.6	0.0068	2,93
	8	Media	312	7.34	1.24	0.90	1.30	1.96	40.3	0.0595	7,27
		DS	77	0.50	1.15	0.19	0.90	0.54	10.8	0.0056	3,88
Road dust	1	Media	17714	77.15	13.98	18.76	20.55	95.60	70.3	7.2829	0,60
		SD	9141	53.89	5.99	17.94	17.89	61.46	31.2	1.1683	0,51
	2	Media	15135	168.04	63.23	25.01	20.77	64.62	217.7	9.2554	0,99
		SD	5312	101.17	42.62	12.89	11.12	30.14	54.2	4.0222	0,37
	3	Media	21873	179.38	70.93	51.49	44.06	98.96	303.9	12.4851	1,18
		SD	9619	186.97	47.21	35.09	28.16	48.16	130.6	3.4419	0,39
	4	Media	17057	270.19	44.26	22.87	39.00	77.55	132.9	8.8465	0,60
		SD	11075	326.38	33.83	19.09	46.31	43.92	44.9	0.8935	0,14
	5	Media	20991	95.09	184.29	34.93	26.71	87.79	200.4	8.1977	0,80
		SD	5680	42.61	152.96	19.14	19.38	17.98	98.2	1.2585	0,20
	6	Media	36844	226.60	116.82	64.03	44.72	106.59	418.4	11.5762	0,91
		SD	16369	123.25	108.58	36.36	17.87	48.24	163.7	1.0956	0,18
	7	Media	21177	189.16	54.93	51.63	32.09	80.86	358.6	7.3204	0,71
		SD	10852	142.54	46.58	34.20	13.71	66.12	241.8	3.4087	0,32
	8	Media	23703	160.64	71.12	51.68	32.96	82.35	242.0	9.2373	0,73
		SD	6895	149.93	45.61	26.07	8.35	24.57	86.5	1.4749	0,19

El análisis estadístico de Correlación Bivariado de Pearson muestra los siguientes resultados (Cuadro 3):

Cuadro 3. Análisis estadístico de correlación bivariado de Pearson, con sus respectivos análisis de p-value, entre diferentes variables.

	Vehicules	Fe	Cu	Pb	Cr	Ni	V	Zn	xlf	kdf
<i>C. equisetifolia</i>										
Vehicules	1.00	0.24 ^b	0.24 ^b	0.31 ^b	0.2	-0.1	0.41 ^a	0.46 ^a	0.23 ^b	0.17
Fe		1.00	0.74 ^a	0.39 ^a	0.89 ^a	0.47 ^a	0.91 ^a	0.69 ^a	0.97 ^a	0.09 ^a
Cu			1.00	0.49 ^a	0.73 ^a	0.50 ^a	0.68 ^a	0.39 ^a	0.74 ^a	-0.18
Pb				1.00	0.45 ^a	0.35 ^b	0.27	0.52 ^a	0.36 ^b	-0.09
Cr					1.00	0.57 ^a	0.85 ^a	0.74 ^a	0.90 ^a	0.05
Ni						1.00	0.46 ^a	0.34 ^a	0.46 ^a	-0.04
V							1.00	0.70 ^a	0.93 ^a	0.22
Zn								1.00	0.70 ^a	0.15
Xlf									1.00	0.14
Kdf										1.00
<i>C. lusitanica</i>										
Vehicules	1.00	-0.07	-0.21	-0.05	-0.36 ^b	-0.28 ^b	-0.08	-0.24 ^b	-0.05	-0.03
Fe		1.00	0.55 ^a	0.57 ^a	0.48 ^a	0.44 ^a	0.49 ^a	0.67 ^a	0.86 ^a	0.18
Cu			1.00	0.51 ^a	0.16	0.16	0.42 ^a	0.44 ^a	0.51 ^a	-0.04
Pb				1.00	-0.03	0.06	0.22	0.27 ^b	0.48 ^a	0.11
Cr					1.00	0.26	0.14	0.45 ^a	0.65 ^a	0.04
Ni						1.00	0.44 ^a	0.19	0.45 ^a	0.07
V							1.00	0.37 ^a	0.45 ^a	0.11
Zn								1.00	0.71 ^a	0.15
Xlf									1.00	0.16
Kdf										1.00
Road dust										
Vehicules	1.00	0.29 ^a	0.11	0.21	0.38 ^a	0.21	0.01	0.39 ^a	0.01	0.27 ^b
Fe		1.00	0.34 ^a	-0.05	0.79 ^a	0.71 ^a	0.77	0.50 ^a	0.24 ^b	0.08
Cu			1.00	-0.04	0.44	0.4	0.36	0.36	-0.03	0.16
Pb				1.00	-0.08	-0.11	-0.12	0.28	0.17	0.16
Cr					1.00	0.73 ^a	0.74 ^a	0.63 ^a	0.11	0.29
Ni						1.00	0.57 ^a	0.47 ^a	0.16	0.28
V							1.00	0.41 ^a	0.08	-0.01
Zn								1.00	0.09	0.39 ^a
Xlf									1.00	0.80 ^a
Kdf										1.00

^a p < 0,01; ^b p < 0,05.

Fuente: (Salazar-Rojas et al., 2023)

El cuadro 3 muestra los coeficientes de correlación bivariados de Pearson y sus respectivos niveles de significancia (p-value). Las correlaciones con niveles de significancia menores a 0,01 y 0,05 muestran correlaciones con niveles de confianza estadístico altos. En esta matriz interesa observar la columna Xlf con respecto a cada variable.

Se puede observar que las correlaciones entre Xlf con respecto a cada variable, para el polvo urbano, solo el Fe muestra una correlación estadísticamente significativa. Además, el cuadro 2 presenta para el Polvo Urbano, valores 10 a 100 veces más altos a los que normalmente se observan para los biomonitores evaluados. Por lo tanto, el Polvo Urbano no resulta ser un buen monitor de calidad, donde se emplean medir las propiedades magnéticas para determinar el contenido de MPs.

En el caso de ambos biomonitores (cuadro 3) sí observamos que todos los MPs, así como la Densidad Vehicular, presentan correlaciones estadísticamente significativas con niveles de confianza superiores al 99%. De los metales estudiados, se exceptúa el Cd, pues su presencia no fue detectada en los monitores seleccionados.

El cuadro 4 muestra los gráficos para cada metal con relación a la susceptibilidad magnética en cada una de las plantas estudiadas.

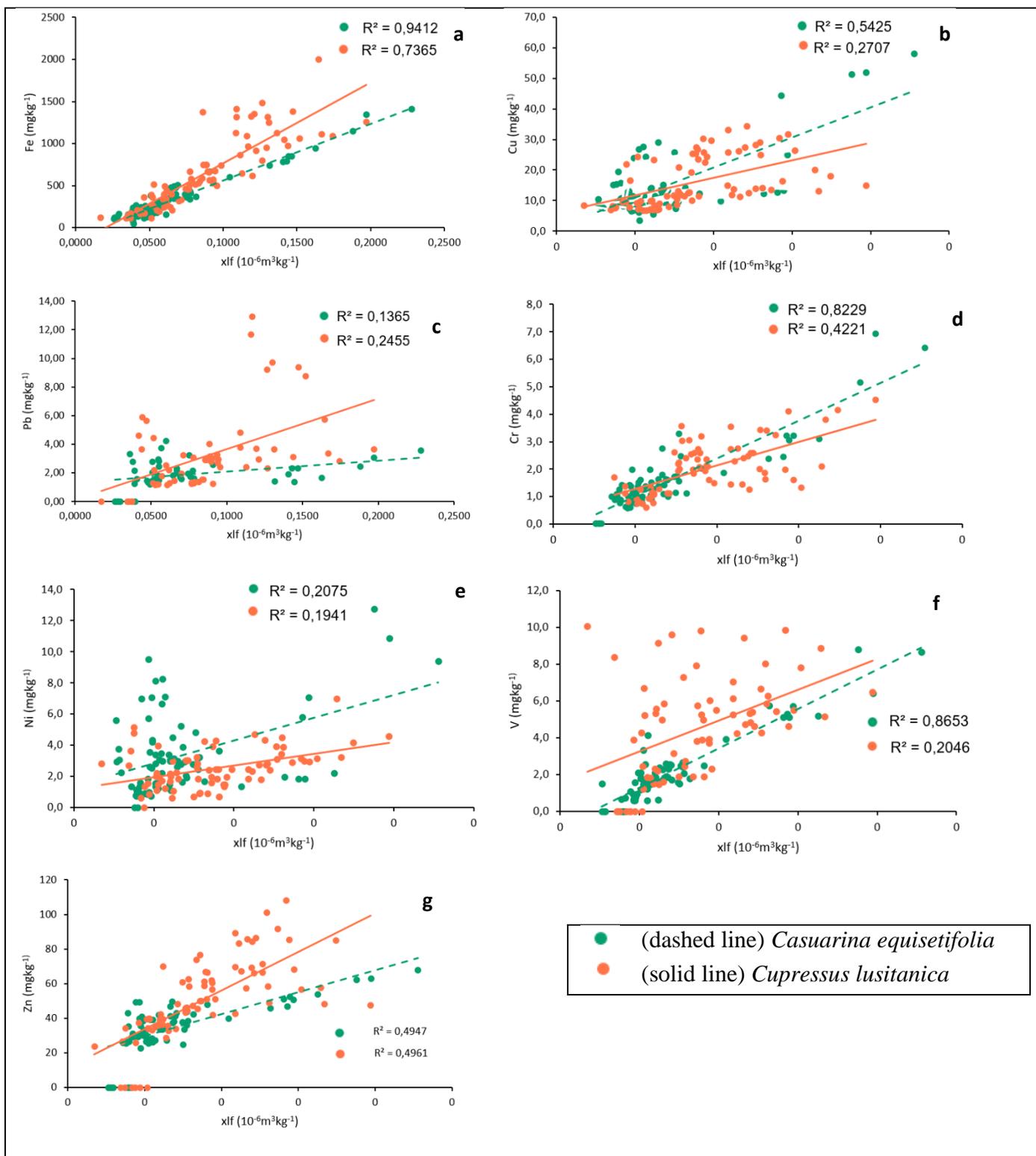


Figura 4. Correlaciones entre χ_{lf} con a) Fe, b) Cu, c) Pb, d) Cr, e) Ni, f) V, y d) Zn en biomonitores: *C. equisetifolia* y *C. lusitanica*. Se dan los valores de R^2 para cada línea en la figura respectiva.

Fuente: (Salazar-Rojas et al., 2023)

Las ecuaciones resultantes para correlacionar cada metal (excepto el Cd) con respecto a la susceptibilidad magnética para dada planta, es como sigue:

Cuadro 4. Fórmulas para el cálculo de la [MP] en función de los valores de xfl en ambos biomonitores

MP	Casuarina	Ciprés
Fe	$y = 6503.4x - 93.058$	$y = 9446.9x - 188.51$
Cu	$y = 170.09x + 3.6375$	$y = 9446.9x - 188.51$
Pb	$y = 170.09x + 3.6375$	$y = 9446.9x - 188.51$
Cr	$y = 170.09x + 3.6375$	$y = 17.068x + 0.4351$
Ni	$y = 29.951x + 1.2451$	$y = 17.068x + 0.4351$
V	$y = 44.681x - 1.0581$	$y = 17.068x + 0.4351$
Zn	$y = 187.95x + 23.724$	$y = 449.55x + 11.862$

Donde Y = [MP] y x = xfl

Conclusiones

Este estudio demostró que existe una correlación estadísticamente significativa entre el contenido de cada MP y su respectiva medición de susceptibilidad magnética, tanto para el árbol de Casuarina como para el Ciprés. El nivel de confianza de estas correlaciones es superior al 99%, excepto para el Pb en la Casuarina, que fue superior al 95%.

La Casuarina presentó correlación entre la medición magnética y la densidad vehicular, superior al 99%, comportamiento que se asume que está relacionado con mayores niveles de contaminación.

Con la Casuarina, la densidad vehicular correlacionó estadísticamente con un nivel de confianza superior al 95%, con el contenido de Fe, Cu, Pb, V y Zinc. En el caso del Ciprés, hay correlación con el Cr, Ni y Zn.

Tanto la Casuarina como el Ciprés resultaron confiables predictores del contenido de todos los MPs (excepto el Cd) a través de la medición de sus propiedades magnéticas.

La medición de las propiedades magnéticas resultó ser un método alternativo confiable y de fácil aplicación, para la determinación del contenido de los metales estudiados (excepto el Cd), capturados por el Ciprés y la Casuarina, en sustitución de los métodos tradicionales químicos tradicionales, que son costosos, de ejecución lenta y cuyos desechos son altamente contaminantes.

Recomendaciones

Se recomienda continuar investigaciones con el uso de esta nueva tecnología para determinar contaminaciones de MPs en el ambiente, a través del uso de estos dos biomonitores para determinar zonas de vulnerabilidad o riesgo, que afectan la salud humana y que deben ser objeto de estudios mas detallados.

Llevar a cabo estudios donde se determine la relación entre uso del suelo con respecto a niveles de riesgo, en diferentes zonas del país, empleando este tipo de tecnología. Actualmente, se han fabricado equipos de campo para la medición de las propiedades magnéticas, lo cual representa un ahorro en recursos pues las muestras no necesitan ser tratadas en el laboratorio.

Este tipo de mediciones se pueden aplicar en polvo urbano, suelo y sedimentos de ríos, con el fin de establecer los efectos que tienen el uso del suelo con relación a la contaminación por MPs. Una vez hechos estos estudios, se pueden establecer mejoras en el manejo del uso del suelo para reducir los niveles de impacto negativo que estos contaminantes causan en el ambiente.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Instituto Tecnológico de Costa Rica por su apoyo financiero y administrativo. Asimismo, al Centro de Investigaciones en Protección Ambiental (CIPA) y al Centro de Investigaciones y Servicios Químicos y Microbiológicos (CEQIATEC), por su apoyo al proyecto.

Asimismo, hacemos extensivo nuestro agradecimiento al Dr. Luis Guillermo Acosta Vargas, de la escuela de Ingeniería Forestal, del ITCR por su importante apoyo como experto en el reconocimiento e inventariado de las especies en los diferentes sitios visitados como posibles puntos de muestreo de este proyecto.

Bibliografía

Acuña-Fernández, E. (2013). *Análisis de regresión*. Universidad de Puerto Rico.

Adachi, K., & Tainosho, Y. (2004). Characterization of heavy metal particles embedded in tire dust.

Environment International, 30(8), 1009–1017. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2004.04.004>

Aguilar-Reyes, B., Cejudo-Ruiz, R., Martínez-Cruz, J., Bautista, F., Goguitchaichvili, A., Carvalho,

C., & Morales, J. (2012). Ficus benjamina leaves as indicator of atmospheric pollution: A reconnaissance study. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 56(3), 879–887.

<https://doi.org/10.1007/s11200-011-0265-1>

- APHA, AWWA and AEF. (2017). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (23rd ed.).
- Briceño-Castillo, J., Herrera-Murillo, J., Solórzano-Arias, D., Beita-Guerrero, V. H., & Rojas-Marín, J. F. (2016). *Informe de Calidad del Aire ÁREA METROPOLITANA DE COSTA RICA*. Estado de la Nación. <https://www.binasss.sa.cr/opac-ms//media/digitales/Informe%20de%20la%20calidad%20del%20aire.%20Area%20Metropolitana%20de%20Costa%20Rica.%202013-2015.pdf>
- Calvo-Brenes, G. (2015). *Ríos: Fundamentos sobre su calidad y su relación con el entorno socioambiental* (First). Editorial Tecnológica.
- Cejudo-Ruíz, R., Bautista, F., Quintana, P., Delgado-Carranza, M. del C., Aguilar, D., Goguitchaichvili, A., & Morales-Contreras, J. J. (2015). Correlación entre elementos potencialmente tóxicos y propiedades magnéticas en suelos de la Ciudad de México para la identificación de sitios contaminados: Definición de umbrales magnéticos. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 32(1), 50–61.
- Davis, S., Boundy, R., & Laboratory, O. R. N. (2021). *Transportation Energy Data Book: Edition 39*.
- Kardel, F., Wuyts, K., De Wael, K., & Samson, R. (2018). Biomonitoring of atmospheric particulate pollution via chemical composition and magnetic properties of roadside tree leaves. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(26), 25994–26004. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2592-z>
- Lee, D., Robertson, C., Ramsay, C., Gillespie, C., & Napier, G. (2019). Estimating the health impact of air pollution in Scotland, and the resulting benefits of reducing concentrations in city centres. *Spatial and Spatio-Temporal Epidemiology*, 29, 85–96. <https://doi.org/10.1016/j.sste.2019.02.003>
- Leng, X., Qian, X., Yang, M., Wang, C., Li, H., & Wang, J. (2018). Leaf magnetic properties as a method for predicting heavy metal concentrations in PM_{2.5} using support vector machine:

A case study in Nanjing, China. *Environmental Pollution*, 242, 922–930.

<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.07.007>

Li, H., Wang, J., Wang, Q., Tian, C., Qian, X., & Leng, X. (2017). Magnetic Properties as a Proxy for Predicting Fine-Particle-Bound Heavy Metals in a Support Vector Machine Approach. *Environmental Science & Technology*, 51(12), 6927–6935.

<https://doi.org/10.1021/acs.est.7b00729>

Losacco, C., & Perillo, A. (2018). Particulate matter air pollution and respiratory impact on humans and animals. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(34), 33901–33910.

<https://doi.org/10.1007/s11356-018-3344-9>

Markert, B. A., Breure, A. M., & Zechmeister, H. G. (2003). *Definitions, strategies and principles for bioindication/biomonitoring of the environment*.

Montgomery, D. C., Peck, E. A., & Vining, G. (2012). *Introduction to Linear Regression Analysis* (Fifth). Wiley.

Muñoz, D., Aguilar, B., Fuentealba, R., & Préndez, M. (2017). Environmental studies in two communes of Santiago de Chile by the analysis of magnetic properties of particulate matter deposited on leaves of roadside trees. *Atmospheric Environment*, 152, 617–627.

<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.12.047>

Ojekunle, Z., Adeboje, M., Taiwo, A., Sangowusi, R., Taiwo, A., & Ojekunle, V. (2015). Tree Leaves as Bioindicator of Heavy Metal Pollution in Mechanic Village, Ogun State. *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, 18(4), 639.

<https://doi.org/10.4314/jasem.v18i4.12>

Perera, F. (2018). Pollution from Fossil-Fuel Combustion is the Leading Environmental Threat to Global Pediatric Health and Equity: Solutions Exist. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(1), 16.

<https://doi.org/10.3390/ijerph15010016>

- Polezer, G., Tadano, Y. S., Siqueira, H. V., Godoi, A. F. L., Yamamoto, C. I., de André, P. A., Pauliquevis, T., Andrade, M. de F., Oliveira, A., Saldiva, P. H. N., Taylor, P. E., & Godoi, R. H. M. (2018). Assessing the impact of PM_{2.5} on respiratory disease using artificial neural networks. *Environmental Pollution*, 235, 394–403.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.12.111>
- Ramos, S. (2016). Los Metales Pesados. Importancia de los estudios en áreas Urbanas y Periurbanas. 26 de Febrero 2016. *Primer congreso internacional de geología médica*.
http://www.sgm.gob.mx/pdfs/26_10%20Los%20Metales%20Pesados%20Est_areas%20urbanas%20y%20periurbanas.pdf
- Salazar-Rojas, T., & Calvo-Brenes, G. (2019). Valoración de las propiedades magnéticas en bioindicadores y en polvo urbano, como método alternativo para monitorear la contaminación atmosférica en zonas de flujo vehicular: Resultados preliminares sobre metales pesados en bioindicadores. *Revista Tecnología en Marcha*.
<https://doi.org/10.18845/tm.v32i6.4229>
- Salazar-Rojas, T., Cejudo-Ruiz, F. R., & Calvo-Brenes, G. (2023). Assessing magnetic properties of biomonitors and road dust as a screening method for air pollution monitoring. *Chemosphere*, 310, 136795. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136795>
- Sharma, P., Yadav, P., Ghosh, C., & Singh, B. (2020). Heavy metal capture from the suspended particulate matter by *Morus alba* and evidence of foliar uptake and translocation of PM associated zinc using radiotracer (⁶⁵Zn). *Chemosphere*, 254, 126863.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126863>
- Stankovic, S., Kalaba, P., & Stankovic, A. R. (2014). Biota as toxic metal indicators. *Environmental Chemistry Letters*, 12(1), 63–84. <https://doi.org/10.1007/s10311-013-0430-6>
- Wang, G., Chen, J., Zhang, W., Ren, F., Chen, Y., Fang, A., & Ma, L. (2019). Magnetic properties of street dust in Shanghai, China and its relationship to anthropogenic activities. *Environmental Pollution*, 255, 113214. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113214>

WHO. (2021). *What are the WHO Air quality guidelines?: Improving health by reducing air pollution*. <https://www.who.int/news-room/feature-stories/detail/what-are-the-who-air-quality-guidelines>