



UNIVERSIDAD PERUANA
CAYETANO HEREDIA

Facultad de

Ciencias e Ingeniería

Asociación entre el manganeso en PM_{10} y el porcentaje de logro satisfactorio en las pruebas de comprensión lectora y matemáticas en estudiantes de segundo de primaria y segundo de secundaria del Perú del 2007 al 2019

TESIS PARA OPTAR POR EL TÍTULO PROFESIONAL DE QUÍMICO
FARMACÉUTICO

AUTOR(ES)

MILAGROS LIDIA PRIALE MENDOZA

ASESOR(ES)

CAROL GEIMY ORDOÑEZ AQUINO

COASESOR(ES)

GUSTAVO FRANCISCO GONZALES RENGIFO

LIMA – PERÚ

2026

Jurado calificador:

Presidenta: Dra. Monica Jehnny Pajuelo Travezaño

Vocal: Mag. Leon Faustino Villegas Vilchez

Secretario: Mag. Diego Alejandro Fano Sizgorich



DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD

Los egresados:

N°	APELLIDOS Y NOMBRES
1.	PRIALE MENDOZA MILAGROS LIDIA

Pertenecientes al programa de la **CARRERA PROFESIONAL DE FARMACIA Y BIOQUÍMICA**, autores del trabajo titulado: **Asociación entre el manganeso en PM_{10} y el porcentaje de logro satisfactorio en las pruebas de comprensión lectora y matemáticas en estudiantes de segundo de primaria y segundo de secundaria del Perú del 2007 al 2019**, el cual ha sido elaborado, sustentado y aprobado, según corresponda, para optar por el **TÍTULO PROFESIONAL DE QUÍMICO FARMACÉUTICO** bajo la modalidad de **TESIS**.

En calidad de docentes asesores de la Universidad Peruana Cayetano Heredia:

N°	APELLIDOS Y NOMBRES DEL DOCENTE	FACULTAD	NIVEL DE ASESORÍA
1.	ORDOÑEZ AQUINO CAROL GEIMY	FACI	ASESOR
2.	GONZALES RENGIFO GUSTAVO FRANCISCO	-	CO ASESOR

Declaramos que el contenido del presente documento es original y que las citas y referencias a otros autores cumplen con las normas académicas establecidas. En ese sentido, hacemos constar que:

- El documento presenta un porcentaje de similitud de **19%**, según el reporte emitido por el software **Turnitin®** (identificador de entrega: **3595310952**; fecha de entrega: **15/06/2026**).
- Tras una revisión detallada del reporte y del contenido del trabajo en cuestión, no se han identificado indicios de plagio.
- Se certifica que el documento respeta los principios de integridad académica y cumple con los requisitos institucionales de originalidad.

Lugar y fecha: **Lima, 15 de junio de 2026**

Firma del asesor

N° DNI: 41440524

ORCID: 0000-0002-3586-2044

Firma del Co-asesor

N° DNI: 09998072

ORCID: 0000-0003-1611-2894

ÍNDICE

Resumen	1
Abstract	2
I. Introducción	3
1.1 Contaminación del aire	3
1.2 Material particulado	4
1.3 Manganeso	5
1.3.1 Mecanismos de transporte del manganeso desde el sistema respiratorio al cerebro	7
1.3.2 Toxicocinética y dosis asociadas al manganismo	7
II. Antecedentes	10
2.1 Monitoreo de la calidad del aire en el Perú	10
2.1.1 Monitoreo de metales pesados en el aire	10
2.2 La educación peruana en contexto	14
2.2.1 El rendimiento académico por niveles de logro	14
2.2.2 Indicadores educativos	15
2.3 Asociación de la exposición del manganeso presente en PM10 en el rendimiento académico	16
III. Planteamiento del problema de investigación y justificación	19
IV. Pregunta de investigación	20
V. Hipótesis	20
VI. Objetivos	20
6.1 Objetivo general	20
6.2 Objetivos específicos	20
VII. Metodología	21
7.1 Diseño de estudio	21
7.2 Población de estudio	21
7.3 Unidad de análisis	21
7.3.1 Criterios de inclusión	22
7.3.2 Criterios de exclusión	22
7.4 Clasificación de variables y operacionalización	23
7.5 Obtención de datos	25
7.6 Análisis estadístico	26
7.6.1 Análisis estadístico descriptivo	27
7.6.2 Análisis estadístico bivariado	27

7.6.3 Análisis estadístico de Regresión lineal múltiple	28
7.7 Consideraciones éticas	29
XIII. Resultados	29
8.1 Características generales descriptivas	29
8.2 Correlación estadística entre las concentraciones de manganeso en PM10 y el rendimiento académico de los estudiantes de segundo de primaria y segundo de secundaria, entre el 2007 al 2019	33
8.3 Análisis de Regresión lineal múltiple	37
8.3.1 Análisis de regresión lineal múltiple para rendimiento en Lectura en estudiantes de primaria	37
8.3.2 Análisis de regresión lineal múltiple para rendimiento en Matemática en estudiantes de primaria	39
8.3.3 Análisis de regresión lineal múltiple para rendimiento en Lectura en estudiantes de secundaria	41
8.3.4 Análisis de regresión lineal múltiple para rendimiento en Matemáticas en estudiantes de secundaria	42
IX. Discusiones	45
X. Fortaleza y Limitaciones	48
XI. Conclusiones	49
XII. Recomendaciones	50
XIII. Referencias	51

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Matriz de Operacionalización de Variables	23
Tabla 2. Características descriptivas: Mediana de manganeso en PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en el aire por departamento entre el 2007 - 2019.	30
Tabla 3. Características descriptivas: Medianas del porcentaje de estudiantes que alcanzaron un nivel de logro satisfactorio por departamento del 2007-2019.	32
Tabla 4. Factores de inflación de la varianza (VIF) del modelo de regresión... ..	37
Tabla 5. Métricas de ajuste del Rendimiento académico en Lectura de primaria	38
Tabla 6. Verificación de supuestos del Rendimiento académico en Lectura de primaria	38
Tabla 7. VIF (multicolinealidad) del modelo de regresión para el rendimiento de Lectura en primaria	38
Tabla 8. Estimación de los parámetros de regresión sobre la variable dependiente (Rendimiento académico en Lectura en Segundo de primaria)	39
Tabla 9. Métricas de ajuste del Rendimiento académico en Matemáticas de primaria	39
Tabla 10. Verificación de supuestos del Rendimiento académico en Matemáticas de primaria	40
Tabla 11. VIF (multicolinealidad) del modelo de regresión para el rendimiento de Matemáticas en primaria	40
Tabla 12. Estimación de los parámetros de regresión sobre la variable dependiente (Rendimiento académico en Matemáticas en Segundo de primaria)	40
Tabla 13. Métricas de ajuste del Rendimiento académico en Lectura de secundaria	41
Tabla 14. Verificación de supuestos del Rendimiento académico en Lectura de secundaria.....	41
Tabla 15. VIF (multicolinealidad) del modelo de regresión para el rendimiento de Lectura en secundaria.....	41
Tabla 16. Estimación de los parámetros de regresión sobre la variable dependiente (Rendimiento académico en Lectura en Segundo de secundaria).....	42
Tabla 17. Métricas de ajuste del Rendimiento académico en Matemáticas de secundaria.....	42

Tabla 18. Verificación de supuestos del Rendimiento académico en Matemáticas de secundaria.....	43
Tabla 19. VIF (multicolinealidad) del modelo de regresión para el rendimiento de Matemáticas en secundaria.....	43
Tabla 20. Estimación de los parámetros de regresión sobre la variable dependiente (Rendimiento académico en Matemáticas en Segundo de secundaria).....	43
Tabla 21. Resumen de los modelos de regresión lineal múltiple de rendimiento académico de niños de primaria y secundaria.	44

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Tamaño relativo del material particulado (PM10 y PM2.5) y su depósito en el sistema respiratorio humano. ⁷	4
Figura 2. Ruta de exposición inhalatoria del manganeso presente en PM10 y su distribución hacia el sistema nervioso central.....	9
Figura 3. Sistema de muestreo de alto volumen. ²²	11
Figura 4. Distribución geográfica de departamentos con y sin información de concentraciones de metales en PM10 en el Perú. ²¹	12
Figura 5. Descripción de los niveles de logro de aprendizaje en evaluaciones educativas. ²⁷	15
Figura 6. Relación dosis–respuesta no lineal entre la exposición al manganeso y el desempeño neurocognitivo. ¹²	18
Figura 7. Flujograma de construcción de la base de datos y definición de la unidad de análisis.....	22
Figura 8. Gráfico de serie de tiempo de la Concentración promedio anual de Manganeso en el aire en PM10 según departamento.	31
Figura 9. Prueba de Normalidad	33
Figura 10. Gráficos de dispersión entre las concentraciones de manganeso en PM10 y el rendimiento académico de los estudiantes a nivel nacional del 2007 al 2019	34
Figura 11. Gráficos de dispersión entre las concentraciones de manganeso en PM10 y el rendimiento académico de los estudiantes en la Costa del 2007 al 2019.....	35
Figura 12. Gráficos de dispersión entre las concentraciones de manganeso en PM10 y el rendimiento académico de los estudiantes en la Sierra del 2007 al 2019	36

Resumen

Objetivo: Evaluar la relación entre las concentraciones de manganeso en PM₁₀ y el porcentaje de logro satisfactorio en las pruebas de comprensión lectora y en matemática de estudiantes de educación de segundo grado de primaria y segundo de secundaria en el Perú entre el 2007 al 2019.

Metodología: Se desarrolló un estudio ecológico, considerando como unidad de análisis las observaciones agregadas por departamento y año. Las concentraciones de Mn en el aire en PM₁₀ se obtuvieron de la Dirección General de Salud Ambiental e Inocuidad Alimentaria (DIGESA), mientras que los resultados de rendimiento académico fueron proporcionados por el Ministerio de Educación (MINEDU). Se aplicaron análisis descriptivos, correlación de Spearman para el análisis bivariado, y regresión lineal múltiple para el análisis multivariado, incorporando variables confusoras de carácter socioeducativo y de acceso a servicios básicos. Se consideró un nivel de significancia estadística de $p < 0.05$.

Resultados: En el presente estudio no se identificaron asociaciones estadísticamente significativas entre las concentraciones de Mn en PM₁₀ y el rendimiento académico a nivel nacional ni regional. Las correlaciones observadas fueron en general de baja magnitud — a nivel nacional en educación secundaria en matemáticas ($\rho = -0,074$; $p = 0,7802$), y a nivel regional en la Costa en educación secundaria en lectura ($\rho = -0,006$; $p = 0,919$) y matemáticas ($\rho = -0,429$; $p = 0,419$), así como en la Sierra en educación secundaria en lectura ($\rho = -0,382$; $p = 0,279$). En los modelos de regresión, la concentración de manganeso en el aire no mostró una asociación estadísticamente significativa con el rendimiento académico. En contraste, variables de carácter educativo, como la asistencia con atraso escolar, evidenciaron una asociación más consistente, particularmente en estudiantes de segundo de primaria.

Conclusiones: Las concentraciones de manganeso en PM₁₀, en los niveles observados, no mostraron una asociación estadísticamente significativa con el rendimiento académico en estudiantes peruanos. No obstante, los hallazgos sugieren que el rendimiento académico responde a un fenómeno multifactorial, en el cual los factores educativos y sociales parecen tener una mayor relevancia en comparación con los factores ambientales evaluados.

Palabras clave: Material particulado, manganeso, rendimiento académico, monitoreo ambiental.

Abstract

Objective: To evaluate the relationship between manganese concentrations in PM₁₀ and the percentage of satisfactory achievement in reading comprehension and mathematics assessments among second-grade primary and second-grade secondary school students in Peru between 2007 and 2019.

Methodology: An ecological study was conducted, considering aggregated observations by department and year as the unit of analysis. Airborne Mn concentrations in PM₁₀ were obtained from the Dirección General de Salud Ambiental e Inocuidad Alimentaria (DIGESA), while academic performance results were provided by the Ministerio de Educación (MINEDU). Descriptive analyses were performed, along with Spearman correlation for bivariate analysis and multiple linear regression for multivariate analysis, incorporating socio-educational and access-to-basic-services confounding variables. A statistical significance level of $p < 0.05$ was considered.

Results: In the present study, no statistically significant associations were identified between Mn concentrations in PM₁₀ and academic performance at the national or regional level. The observed correlations were generally of low magnitude—at the national level, in secondary education mathematics ($\rho = -0.074$; $p = 0.7802$), and at the regional level, in the Coast region in secondary education reading ($\rho = -0.006$; $p = 0.919$) and mathematics ($\rho = -0.429$; $p = 0.419$), as well as in the Highlands region in secondary education reading ($\rho = -0.382$; $p = 0.279$). In the regression models, airborne manganese concentration did not show a statistically significant association with academic performance. In contrast, educational variables, such as overage school attendance, showed a more consistent association, particularly among second-grade primary school students.

Conclusions: The concentrations of manganese in PM₁₀, at the observed levels, did not show a statistically significant association with academic performance in Peruvian students. However, the findings suggest that academic performance is a multifactorial phenomenon, in which educational and social factors appear to have greater relevance compared to the environmental factors evaluated.

Keywords: Particulate matter, manganese, academic performance, environmental monitoring.

I. Introducción

1.1 Contaminación del aire

A lo largo de la historia, la calidad del aire ha estado influenciada por actividades humanas, por lo que la contaminación atmosférica no puede considerarse un problema reciente; sus orígenes se remontan a tiempos ancestrales, cuando los primeros seres humanos utilizaban la leña y el fuego para encender fogatas y cocinar alimentos, generando humo que ya afectaba el entorno. Sin embargo, los primeros intentos formales por regular este problema aparecieron en el siglo XIII, cuando Eduardo I de Inglaterra emitió una orden que prohibía el uso de carbón para reducir los humos densos que oscurecían el cielo de Londres. Fue después, con la llegada de la Revolución Industrial en el siglo XVII, que la contaminación atmosférica comenzó a intensificarse a escala global. La creciente dependencia de combustibles fósiles como el carbón y posteriormente el petróleo impulsó el desarrollo económico, pero también liberó al ambiente grandes cantidades de sustancias nocivas, marcando el inicio de una crisis ambiental que perdura hasta nuestros días.¹

El aire es un recurso vital e ineludible para la existencia de la totalidad de organismos vivientes. Cada día, nuestros pulmones procesan alrededor de 15 kilogramos de aire, lo que equivale a inhalar más de 10,000 litros en solo 24 horas. Sin embargo, junto con ese aire, también ingresan al organismo partículas invisibles que representan una amenaza para la salud. Se estima que diariamente respiramos entre 100.000 y 10 billones de partículas microscópicas, conocidas como material particulado, las cuales pueden alojarse en las vías respiratorias y desencadenar múltiples enfermedades si la exposición es constante.²

La exposición a partículas finas y ozono representa un importante factor de riesgo, con una estimación de 8,34 millones de muertes anuales a nivel mundial (IC 95%: 5,63 a 11,19).³

De acuerdo con el informe World Air Quality 2024, el Perú se posiciona en el puesto 44 a nivel global en cuanto a una calidad del aire deficiente y el quinto lugar a nivel de

Latinoamérica y el Caribe, reflejando una situación crítica de millones de personas a un riesgo constante de enfermedades respiratorias, cardiovasculares y otras complicaciones derivadas de la mala calidad del aire.⁴

Este escenario constituye una preocupación significativa, especialmente si se considera que la calidad del aire en el Perú no cumple con los valores de referencia establecidos por la Organización Mundial de la Salud. La persistencia de estos niveles permisibles de contaminantes podría implicar un riesgo importante para la salud de la población.⁵

1.2 Material particulado

El material particulado se divide según su tamaño en partículas gruesas (PM₁₀), las cuales miden entre 10 μm a 2,5 μm ; partículas finas (PM_{2.5}), las cuales tienen una medida inferior a 2,5 μm ; y las ultrafinas, que tienen una medida menor a los 0,1 μm .³ Entre estas, las partículas finas, tienden a tener los impactos más graves en el estado saludable del ser humano, así como del ambiente, debido a su pequeño tamaño y prolongado tiempo de residencia.⁶

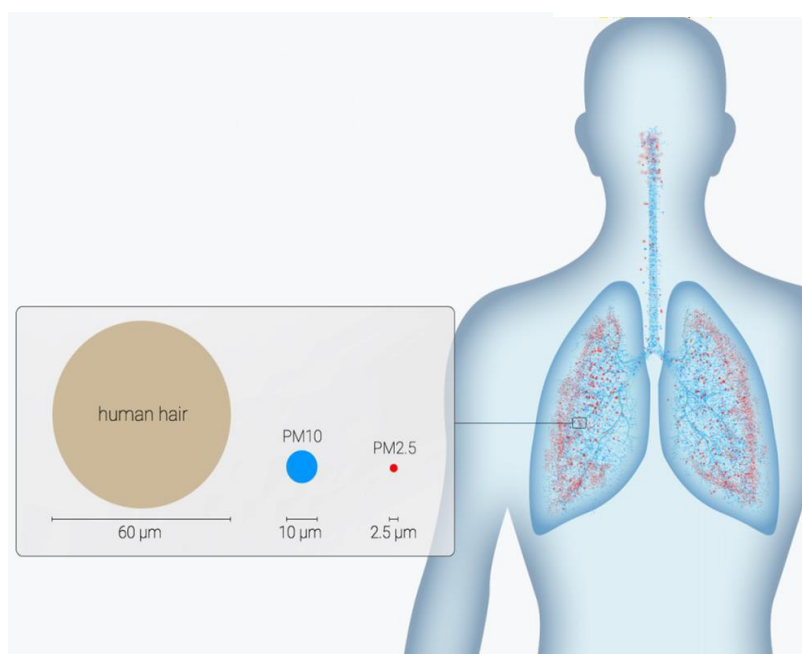


Figura 1. Tamaño relativo del material particulado (PM10 y PM2.5) y su depósito en el sistema respiratorio humano.⁷

El material particulado es considerado uno de los contaminantes atmosféricos más relevantes, y la evidencia disponible indica que la exposición prolongada a este puede estar asociada con el desarrollo de enfermedades crónicas, particularmente de tipo cerebrovascular, cardiovascular y respiratorio.⁸

Se entiende por material particulado el conjunto de partículas sólidas o líquidas que permanecen suspendidas en la atmósfera, cuya composición se encuentra sujeta a los procesos naturales o actividades antrópicas como emisiones industriales o de vehículos del lugar de estudio. Una investigación en una universidad en el sur de Lima Metropolitana encontró Aluminio (Al), Hierro (Fe), Cobre (Cu), Magnesio (Mg), Sodio (Na), Fósforo (P), Silicio (Si) y Estroncio (Sr) en PM₁₀; de origen antropogénico, debido a la presencia de partículas asociadas a la combustión de combustibles fósiles, así como a las actividades de construcción y a la formación de aerosoles secundarios, y de origen geogénico, debido a la presencia de partículas asociadas a la resuspensión de aerosoles terrestres y marinos.⁹

En cambio, en Tailandia, encontraron metales en PM₁₀ tales como el Arsénico (As), Cadmio (Cd), Cromo (Cr), Plomo (Pb), Niquel (Ni), Manganeso (Mn) en PM₁₀, que de acuerdo con un análisis de componentes principales (ACP) determinaron que las emisiones industriales representan una de las fuentes más relevantes de contaminación del aire.¹⁰

La exposición a sustancias contaminantes del ambiente atmosférico se ha vinculado con déficits cognitivos, procesos de neurodegeneración, neuroinflamación y estrés oxidativo.¹¹ Estos contaminantes pueden activar el sistema inmunológico, incrementando la expresión de citocinas y desencadenando una respuesta inflamatoria en el sistema nervioso central. Cuando esta respuesta se mantiene en el tiempo, puede favorecer un mayor riesgo de neurodegeneración, caracterizada por la pérdida progresiva de células neuronales.¹²

1.3 Manganeso

El manganeso es un metal esencial para el organismo humano, y tiene una participación esencial en el desarrollo y funcionamiento del cerebro¹³. Además, participa en diversos

procesos biológicos fundamentales, como el desarrollo del sistema nervioso y la función cognitiva. Este elemento cumple funciones específicas que no pueden ser reemplazadas por otros metales, especialmente en la actividad de enzimas dependientes de Mn, entre las que se incluyen la glutamina sintetasa, la agmatinasa, la arginasa y la superóxido dismutasa dependiente de manganeso.¹²

La principal vía de exposición temprana al manganeso presente en el material particulado (PM) corresponde a la inhalación de estas partículas¹³. En el caso del Mn asociado a PM10, este puede ingresar al organismo a través del sistema respiratorio, alcanzar el tejido pulmonar y, posteriormente, acceder al sistema nervioso central mediante mecanismos de absorción y transporte asociados a la vía olfatoria. Por ejemplo, en Estados Unidos, la principal vía de exposición temprana al manganeso corresponde a la inhalación de partículas presentes en el aire.¹³

Aunque el manganeso es un elemento esencial para el correcto funcionamiento fisiológico del organismo, la exposición prolongada a concentraciones elevadas puede provocar un trastorno neurotóxico del control motor conocido como manganismo. El cual se caracteriza por daño en las neuronas dopaminérgicas, alteraciones del movimiento y deterioro cognitivo, además de presentar manifestaciones clínicas similares a las observadas en la enfermedad de Parkinson.¹⁴

El manganeso que logra ingresar al torrente sanguíneo posee la capacidad para traspasar la barrera hematoencefálica, lo que le permite acumularse preferentemente en regiones específicas del cerebro, especialmente en los ganglios basales, como la sustancia negra, el cuerpo estriado y el globo pálido. Estas áreas están estrechamente relacionadas con la regulación del movimiento corporal. En particular, la vía negro-estriada, que forma parte del sistema dopaminérgico, ejecuta una función fundamental dentro del control de la actividad motora. La acumulación excesiva de manganeso en estas zonas puede alterar la neurotransmisión dopaminérgica y contribuir al desarrollo de trastornos neurológicos similares a los observados en enfermedades como el Parkinson.¹²

1.3.1 Mecanismos de transporte del manganeso desde el sistema respiratorio al cerebro

El manganeso (Mn) inhalado accede al cerebro mediante dos rutas principales: la vía hematológica y la vía olfatoria directa, las cuales actúan de manera complementaria. Tras su depósito en los alvéolos pulmonares, el Mn, principalmente en forma de Mn^{2+} o Mn^{3+} , atraviesa la barrera alveolocapilar e ingresa a la circulación sistémica, donde se transporta unido a proteínas como la transferrina, albúmina o formando complejos con citrato. Desde la sangre, el Mn alcanza la barrera hematoencefálica y penetra al sistema nervioso central mediante mecanismos específicos: el Mn^{3+} utiliza el receptor de transferrina (TfR) a través de endocitosis mediada por receptor, mientras que el Mn^{2+} puede ingresar mediante el transportador de metales divalentes 1 (DMT1), los transportadores ZIP8 y ZIP14, así como a través de canales de calcio dependientes de voltaje, debido a su similitud con el Ca^{2+} . Estos procesos facilitan su paso a través del endotelio cerebral y su posterior distribución en el parénquima.¹⁵

De manera paralela, el Mn puede alcanzar el cerebro directamente a través de la vía olfatoria, especialmente relevante en la exposición a partículas finas. En este caso, el Mn depositado en la mucosa olfativa es captado por neuronas sensoriales y transportado intracelularmente a lo largo de sus axones mediante transporte axonal anterógrado dependiente de microtúbulos, mediado por proteínas motoras como la kinesina. Este proceso conduce al bulbo olfatorio y posteriormente a regiones más profundas como el tracto olfatorio y el cuerpo estriado, siguiendo un patrón ipsilateral. Modelos farmacocinéticos han demostrado que esta vía constituye una contribución significativa al contenido de Mn en regiones olfativas tras la inhalación. Como consecuencia de estos mecanismos, el Mn tiende a acumularse preferentemente en estructuras como los ganglios basales; cuando esta acumulación es excesiva o crónica, puede dar lugar al desarrollo de manganismo, un cuadro neurotóxico caracterizado por alteraciones motoras y conductuales similares a las observadas en la enfermedad de Parkinson.¹⁶

1.3.2 Toxicocinética y dosis asociadas al manganismo

En términos toxicocinéticos, el Mn se absorbe principalmente por vía inhalatoria (40–70%), mientras que la absorción intestinal representa solo entre 3–5%, regulada por el

estado del hierro corporal.¹³ El grado de absorción por inhalación es una función del tamaño de partícula, porque el tamaño determina el grado y la ubicación de la deposición de partículas en las vías respiratorias. El manganeso asociado a partículas de menor tamaño que alcanzan las vías respiratorias inferiores es absorbido principalmente hacia la circulación sanguínea y el sistema linfático. En cambio, cuando se encuentra en partículas de mayor tamaño (PM₁₀) o en nanopartículas que se depositan en la mucosa nasal, puede trasladarse directamente al cerebro mediante las vías nerviosas olfatoria y trigeminal.¹⁵

Una vez absorbido, se une a proteínas plasmáticas y se distribuye hacia órganos como el hígado, riñones y cerebro, donde se acumula preferentemente en los ganglios basales. No experimenta biotransformación y se elimina principalmente por vía biliar, con una vida media biológica que puede alcanzar varias semanas. Cuando la excreción se ve sobrepasada, el Mn se acumula en el sistema nervioso central, donde promueve estrés oxidativo, disfunción mitocondrial y alteraciones dopaminérgicas responsables de los síntomas motores y cognitivos característicos del manganismo.¹³

La exposición repetida a la inhalación de manganeso es ampliamente reconocida como de alta preocupación, según informes de casos y estudios epidemiológicos de grupos de personas expuestas ocupacional y ambientalmente. La evidencia proveniente de investigaciones en humanos indica que la inhalación de altos niveles de manganeso se asocia con el desarrollo de manganismo, un síndrome neurológico de carácter incapacitante.¹³

Trabajadores expuestos a niveles de manganeso presentes en el aire presentaron déficits en pruebas de funciones neuromotoras o cognitivas, expuestos crónicamente a valores que varían de aproximadamente 0,07 a 0,97 mg de manganeso/m³ (manganeso en mediciones de polvo total o inhalable). En un estudio epidemiológico transversal de 141 trabajadores en una planta productora de dióxido de manganeso y sal, en donde se evaluaron las condiciones neurológicas preclínicas en los trabajadores expuestos a 0,97 mg de manganeso (concentración media en polvo total)/m³, se encontró déficits medios estadísticamente significativos en los trabajadores expuestos, en comparación con el grupo control, en pruebas de tiempo de reacción simple (visual), capacidad de memoria a corto plazo audio verbal, coordinación ojo-mano y firmeza manual.¹⁷

Por otro lado, en un estudio transversal, en donde participaron 288 adultos, de los cuales 168 mujeres y 120 hombres, pertenecientes a comunidades cercanas a plantas de manganeso en Molango, México, con exposiciones entre 0 y 5,86 $\mu\text{g Mn}/\text{m}^3$, se evaluaron pruebas neuropsicológicas para la función cognitiva (estado cognitivo general, atención, fluidez semántica y fonológica, construcción, memoria verbal, codificación y recuperación de la memoria visual, y depresión). Utilizando el análisis de regresión logística considerando la concentración de manganeso en el aire como variable de exposición, y un punto de corte de 0,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, se observó que una de las diez medidas cognitivas tuvo un riesgo significativamente mayor de bajo rendimiento (atención medida por la prueba de extensión de dígitos, OR = 1,75, IC 1,01–3,06), concluyendo que la exposición a niveles elevados de manganeso en el aire se asocia con alteraciones en la atención, lo que constituye evidencia de deterioro cognitivo en la población expuesta.¹⁸

Por lo general, las manifestaciones clínicas de la exposición por inhalación de alto nivel al manganeso no se hacen evidentes hasta que la exposición ha ocurrido durante varios años, pero algunas personas pueden comenzar a mostrar signos después de tan solo algunos meses de exposición. Por ejemplo, Rodier (1995), informó que el porcentaje más alto de casos de manganismo (28, o 24,4%) ocurrió en mineros con 1 a 2 años de experiencia. Solo se reportaron seis casos de manganismo (5.2%) en hombres con exposición de 1 a 3 meses.¹⁹

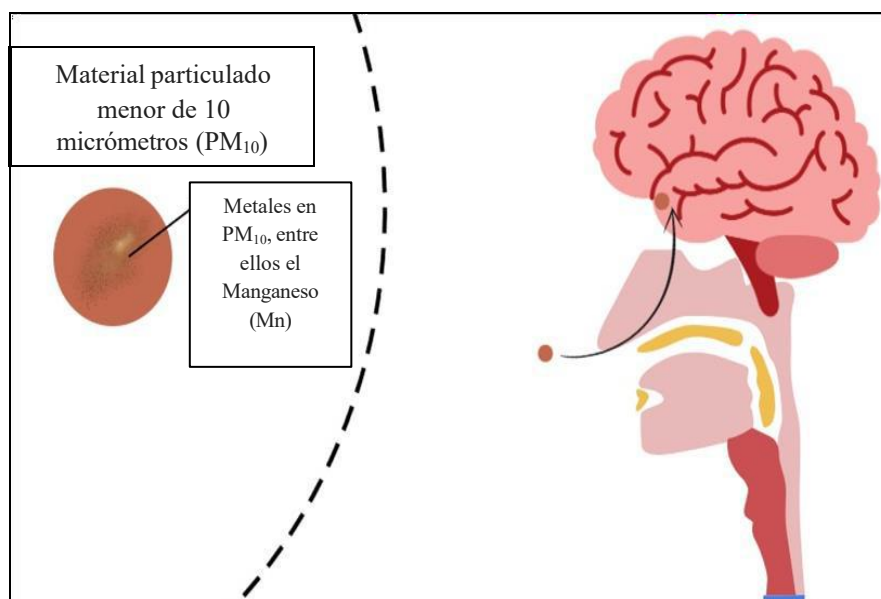


Figura 2. Ruta de exposición inhalatoria del manganeso presente en PM10 y su distribución hacia el sistema nervioso central. Fuente: Elaboración propia.

II. Antecedentes

2.1 Monitoreo de la calidad del aire en el Perú

En Lima, el control de la calidad del aire es una tarea desarrollada por diversas instituciones estatales. El Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú, adscrito al Ministerio del Ambiente, tiene a su cargo la vigilancia atmosférica y proporciona información actualizada sobre las condiciones del aire en Lima Metropolitana a través de una red de diez estaciones de monitoreo. Asimismo, la Dirección General de Salud Ambiental e Inocuidad Alimentaria (DIGESA), que pertenece al Ministerio de Salud (MINSA), desarrolla acciones de vigilancia sanitaria orientadas a la protección de la salud pública, contando con siete estaciones de monitoreo en la misma área.²⁰

En conjunto, Lima Metropolitana cuenta actualmente de 17 estaciones destinadas a la vigilancia de la calidad del aire. Cada estación se encuentra administrada por el SENAMHI y DIGESA según su ámbito de competencia. Estas estaciones están equipadas con tecnologías que emplean métodos activos y/o automáticos, lo que permite una recolección continua y precisa de registros referentes a los índices de deterioro atmosférico en diversos puntos de la ciudad.²⁰

2.1.1 Monitoreo de metales pesados en el aire

La DIGESA, realiza el monitoreo de metales pesados en el aire en Lima y a nivel nacional, para ello primero realiza el monitoreo diario de PM₁₀ mediante el método activo para material particulado, con la utilización de un equipo muestreador de alto volumen (Figura 3).²¹

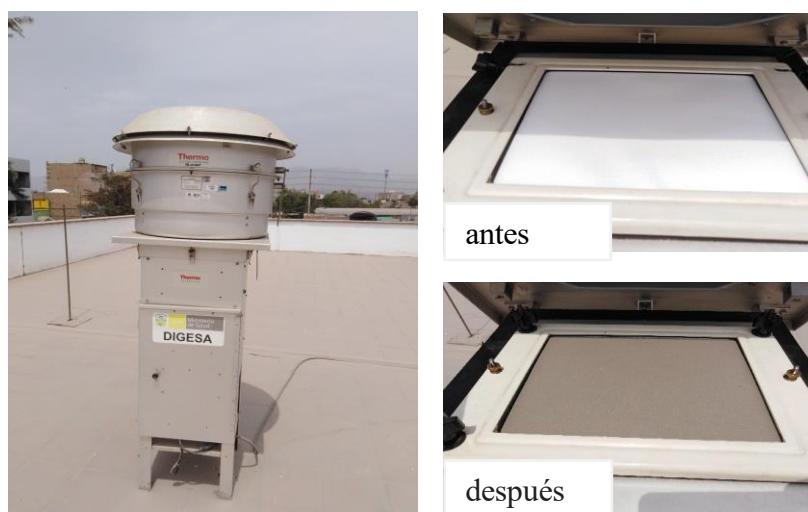


Figura 3. Sistema de muestreo de alto volumen.²²

Las muestras de filtros de PM_{10} recolectadas son posteriormente analizadas en su laboratorio de análisis químico, mediante espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS), caracterizada por su alta sensibilidad y precisión que permite realizar un barrido completo de metales que tienen presencia en el aire, tales como: Aluminio (Al), Antimonio (Sb), Arsénico (As), Bario (Ba), Berilio (Be), Boro (B), Cadmio (Cd), Calcio (Ca), Cerio (Ce), Cobalto (Co), Cobre (Cu), Cromo (Cr), Estaño (Sn), Estroncio (Sr), Fósforo (P), Hierro (Fe), Litio (Li), Magnesio (Mg), Manganeseo (Mn), Mercurio (Hg), Molibdeno (Mo), Níquel (Ni), Plomo (Pb), Potasio (K), Selenio (Se), Silicio (Si), Talio (Tl), Titanio (Ti), Vanadio (V) y Zinc (Zn).²¹

Las concentraciones obtenidas de estos metales en el material particulado PM_{10} pueden obtenerse desde la plataforma web oficial de la DIGESA (Figura 4), garantizando así el acceso libre a información ambiental relevante para la ciudadanía.²¹



Figura 4. Distribución geográfica de departamentos con y sin información de concentraciones de metales en PM10 en el Perú.²¹

En 2017, el Gobierno del Perú aprobó el nuevo Estándar de Calidad Ambiental para Aire (ECA-aire) mediante el Decreto Supremo N.º 003-2017-MINAM, en el cual se establecieron valores de referencia únicamente para dos metales: plomo (Pb) y mercurio (Hg). En consecuencia, para los demás elementos metálicos, la Dirección General de Salud Ambiental e Inocuidad Alimentaria utiliza como referencia normativa los criterios internacionales AAQC (Ambient Air Quality Criteria) de Toronto, Canadá (2020). En el caso específico del manganeso presente en PM₁₀, el valor referencial diario es de 0,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.²³

La normativa más reciente (Decreto Supremo N° 011-2023-MINAM) añadió arsénico, cadmio y cromo, pero excluyó al manganeso, a pesar de su potencial tóxico. Esta omisión deja a la población general —en zonas urbanas, industriales o mineras— sin una protección adecuada frente a un contaminante que podría estar afectando sus capacidades cognitivas y, en consecuencia, su desempeño académico.²⁴

La DIGESA, para los años evaluados; es decir, del 2007 al 2019, solo cuenta con información para 16 departamentos, siendo estos Lima (provincia y metropolitana), Piura, Ucayali, Cusco, Cajamarca, Loreto, Junín, Ica, Puno, Áncash, Moquegua, Pasco, Ayacucho, Huancavelica y Apurímac.²¹

La DIGESA realiza el monitoreo de calidad del aire bajo un enfoque orientado a la prevención y evaluación de riesgos para la salud ambiental, el cual también es utilizado en investigaciones académicas relacionadas con esta temática. Este enfoque prioriza la ubicación de las estaciones de monitoreo en función del riesgo potencial para la población, considerando las condiciones de la calidad del aire. Asimismo, dichas actividades se desarrollan conforme a los lineamientos técnicos establecidos en el Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad Ambiental del Aire, aprobado mediante el Decreto Supremo N°010-2019-MINAM, lo que contribuye a asegurar la estandarización y confiabilidad de los datos obtenidos.²⁵

La instalación del equipo de monitoreo se basa en criterios técnicos tales como la altura de la entrada de la muestra debe encontrarse entre 1.5 m a 4 m, lo cual resulta apropiado al considerar que la medición está orientada a evaluar el aire que respira la población; el equipo debe instalarse a una distancia mínima equivalente a 2,5 veces la diferencia de altura de obstáculos, distancia horizontal mayor o igual a 20 m respecto a fuentes de emisión cercana. Cabe señalar que los criterios son técnicamente importantes, pero finalmente el número de equipos en una zona a monitorear dependerá de la accesibilidad, condiciones de seguridad y la disponibilidad de suministro eléctrico en los sitios seleccionados para el monitoreo.²⁵

En ese sentido, la vigilancia de metales pesados en PM_{10} , en particular de las concentraciones de manganeso en PM_{10} son importantes para hacer seguimiento de su asociación en el rendimiento académico de estudiantes. Los hallazgos de la presente investigación podrían aportar evidencia científica que impulse la incorporación del manganeso en la normativa ambiental, así como la formulación de políticas de salud pública y educación orientadas a reducir los riesgos en la población escolar.

2.2 La educación peruana en contexto

2.2.1 El rendimiento académico por niveles de logro

En el Perú, el desempeño estudiantil se mide a través de la Evaluación Muestral (EM) aplicada por el MINEDU. Esta evaluación se dirige a una muestra representativa de alumnos de instituciones educativas públicas y privadas, con la finalidad de evaluar el nivel de aprendizaje logrado en relación con los estándares instaurados dentro del Currículo Nacional de la Educación Básica (CNEB). A través de esta herramienta, es posible identificar el porcentaje en que el alumnado logra los aprendizajes que se esperan en áreas específicas y en determinados grados, lo que permite orientar decisiones pedagógicas y de política educativa basadas en evidencia.²⁶

Se evalúa a estudiantes de los grados de segundo, cuarto y sexto del nivel primario, y a estudiantes de segundo nivel secundario. A los estudiantes de primaria, se les evalúa en lo relativo a Matemática y Comunicación; mientras que, al alumnado del nivel secundario, se les estima dentro del ámbito de Matemática, Comunicación y Ciencia y Tecnología.²⁶

Los resultados obtenidos en dichas evaluaciones se presentan bajo dos enfoques principales: medida promedio y niveles de logro. Cada educando consigue una medida personal en cada prueba aplicada, y a partir del promedio aritmético de esas medidas individuales se calcula la medida promedio (MP) de un grupo determinado. Este promedio puede referirse al conjunto de estudiantes de un centro educativo, una Unidad de Gestión Educativa Local (UGEL), una Dirección Regional de Educación (DRE) o incluso del país en su totalidad. Por otro lado, los niveles de logro son categorías del grado de aprendizaje alcanzado por el alumnado. Estas categorías son definidas por puntos de corte establecidos con base en la medida obtenida, y permiten clasificar a los estudiantes en tres niveles: “en inicio” (cuando los aprendizajes aún son incipientes), “en proceso” (cuando están en desarrollo) y “satisfactorio” (cuando han sido consolidados conforme a lo esperado por el currículo nacional).²⁷

El nivel “En inicio” indica que el estudiante ha alcanzado únicamente aprendizajes elementales en relación con lo esperado para el ciclo sujeto a evaluación. El nivel “En

proceso” señala que ese alumno ha logrado de forma parcial los aprendizajes previstos, mostrando avances, pero aún con aspectos por consolidar. Finalmente, el nivel “Satisfactorio” refleja que ese educando ha alcanzado plenamente los aprendizajes que se esperan para el ciclo correspondiente.²⁷

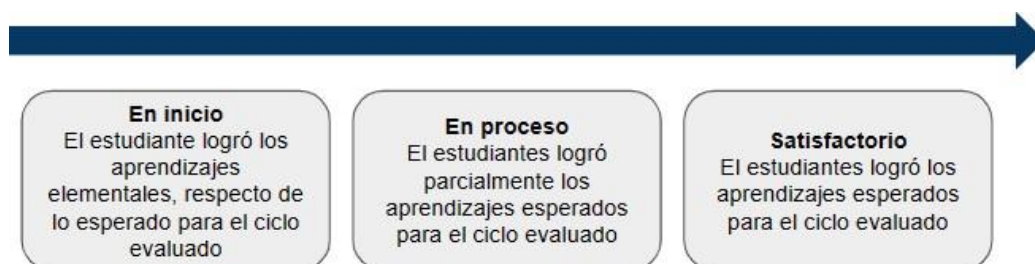


Figura 5. Descripción de los niveles de logro de aprendizaje en evaluaciones educativas.²⁷

La Evaluación Muestral de Estudiantes (EM) 2022, aplicada a nivel nacional por el MINEDU, tras el retorno a la educación presencial, evidenció una reducción significativa en los resultados de aprendizaje en comparación con los obtenidos en 2019, especialmente en el área de Matemáticas. Esta área mostró la mayor caída en los logros alcanzados, reflejada tanto en la disminución del puntaje promedio como en el porcentaje de estudiantes que alcanzaron el nivel satisfactorio. En 2022, solo el 11,8 % de estudiantes de 2° de primaria lograron un desempeño esperado, mientras que en 4° grado de primaria fue el 23,3 %, y en 2° grado de secundaria el 12,7 %, representando disminuciones de 5,2, 10,7 y 5 puntos porcentuales, respectivamente, en relación con los resultados registrados en 2019.²⁸

2.2.2 Indicadores educativos

El INEI a través de la Encuesta Nacional de Hogares (ENAHOG) de carácter anual y continuo, proporciona una amplia variedad de indicadores educativos relevantes, los cuales permiten analizar factores que pueden tener un impacto directo o indirecto en el rendimiento académico de los estudiantes a nivel regional y nacional.

Dos indicadores clave son: la tasa neta y la tasa bruta de matrícula. La tasa neta representa el porcentaje de estudiantes inscritos en el nivel educativo que corresponde a su edad normativa, es decir, aquellos que se encuentran en el grado escolar adecuado según su edad. Por otro lado, la tasa bruta considera el total de estudiantes matriculados en un determinado nivel educativo, sin importar si su edad está dentro del rango esperado para ese nivel. Para este análisis, se estudian ambas tasas en dos rangos etarios específicos: de 6 a 11 años, correspondiente a la edad típica para cursar la educación primaria, y de 12 a 16 años, asociada a la educación secundaria. Esta información resulta fundamental para evaluar el alcance del sistema educativo, así como para identificar posibles retrasos, rezagos o desigualdades en el acceso a la escolarización.^{29,30}

Por otro lado, la tasa de asistencia escolar es otro indicador relevante, el cual lleva el mismo método empleado que la tasa de matrícula escolar, sólo que en este caso solo se tienen los resultados de una tasa de asistencia escolar neta.²⁹

Otro indicador es la asistencia escolar en los niveles de educación primaria y secundaria considerando tres categorías: asistencia en edad normativa, asistencia con atraso escolar y asistencia con adelanto escolar. La categoría de edad normativa hace referencia a los estudiantes que asisten al grado escolar correspondiente a su edad. Por su parte, la asistencia con atraso escolar se refiere a aquellos estudiantes que, por diversos motivos, cursan un grado inferior al que les correspondería según su edad cronológica. En contraste, asistencia con adelanto escolar describe a los estudiantes matriculados en un grado superior al esperado para su edad. Este análisis permite identificar desajustes en la trayectoria escolar, los cuales pueden estar vinculados a factores como repetencia, inicio tardío de la escolarización o altos niveles de desempeño académico. Es importante mencionar que se consideran más indicadores; sin embargo, son a partir de edades superiores a las de primaria y secundaria.²⁹

2.3 Asociación de la exposición del manganeso presente en PM₁₀ en el rendimiento académico

Respecto a la relación entre metales pesados, como el manganeso y el rendimiento académico, la evidencia científica sugiere que la exposición a este, puede inducir

alteraciones tanto estructurales como bioquímicas en regiones corticales del cerebro, afectando procesos como la memoria y diversas funciones cognitivas.³¹

Asimismo, el manganeso interviene en la regulación de múltiples neurotransmisores, entre ellos la dopamina, el ácido gamma-aminobutírico (GABA), el glutamato y la acetilcolina. En casos de sobreexposición, estos sistemas neuroquímicos pueden desequilibrarse, lo que repercute en funciones cerebrales relacionadas con el aprendizaje, la cognición, el control motor y la memoria. Sobreexposición, que puede resultar de numerosas fuentes, incluyendo fuentes ambientales, exposiciones ocupacionales o exposiciones dietéticas al Mn, como el agua potable contaminada.¹²

Como antecedente relevante para el presente estudio, se considera un estudio que evaluó las concentraciones de la interacción del Fe y Mn en PM₁₀ y su asociación con el desempeño estudiantil en infantes del segundo nivel primario, mediante un estudio ecológico. Se observó una correlación inversa entre el Mn presente en PM₁₀ y el porcentaje de niños con rendimiento académico satisfactorio en las regiones de Yauli-Pasco, con coeficientes de correlación de $r = -0,62$ ($p < 0,01$) para comprensión lectora y $r = -0,57$ ($p < 0,01$) para matemáticas.³²

Ciudad de México destaca por las altas concentraciones de material particulado, principalmente de PM_{2.5}. Por lo que un estudio abordó una región cerebral específica asociada con presencia de los metales y las respuestas neuroinflamatorias en dos objetivos de contaminación del aire: lóbulo frontal y bulbo olfatorio. Se encontró que los residentes de esta ciudad, presentaron mayores concentraciones de metales asociados con material particulado: manganeso ($p=0.003$), níquel y cromo ($p=0.02$), junto con mayores concentraciones de ARNm de COX2 frontal ($p=0.008$) e IL1 β ($p=0.0002$) y COX2 ($p=0.005$) en el bulbo olfatorio, lo que indica neuroinflamación.³³

En los últimos años se ha descrito la posible existencia de una relación no lineal en forma de U invertida entre la exposición al manganeso y la aparición de efectos adversos en el desarrollo neurológico infantil, lo que sugiere que este elemento puede actuar tanto como nutriente esencial como agente neurotóxico.¹² (Figura 6.)

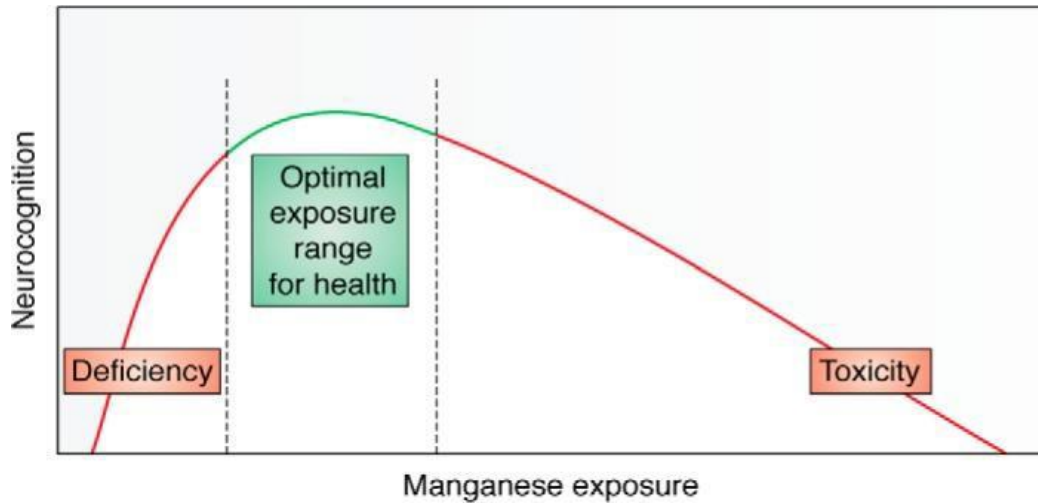


Figura 6. Relación dosis–respuesta no lineal entre la exposición al manganeso y el desempeño neurocognitivo.¹²

Para determinar la asociación entre la exposición temprano al Mn y el neurodesarrollo infantil, en la ciudad de México reclutaron 448 niños a quienes le dieron seguimiento por tres años desde su nacimiento. A los 1 y 2 años de edad les recolectaron muestras de sangre para determinar la concentración de Mn y lo analizaron por ICP y cada seis meses pasaban pruebas de desarrollo mental y psicomotor. Hallando una asociación invertida en U entre los niveles de Manganeso en sangre y su desarrollo mental.³⁴

Una revisión de literatura se enfocó en la revisión de investigaciones en Web of Science, Scopus y Base de datos de educación en el 2020 sobre la contaminación atmosférica relacionada con el tráfico en las escuelas y la función cognitiva, neurodesarrollo y memoria en niños de primaria entre los 7 a los 13 años, encontrando evidencia limitada cuando se refiere a PM₁₀ pero sugiere posibles asociaciones negativas de amplio alcance sobre la atención, el razonamiento y los puntajes de las pruebas académicas.³⁵

En un estudio transversal en el México en el 2006 al 2007 compararon a niños de 7 y 11 expuestos y no expuestos residentes en el distrito minero de Molango, considerado uno de los depósitos más grandes de Mn en el mundo; aplicaron la versión revisada de la Escala de Inteligencia de Wechsler para Niños, adaptada a la población mexicana, es una prueba psicométrica más utilizada para la evaluación de la función intelectual de los niños en estudios de neurotoxicidad, además tomaron las medidas antropométricas y muestras

de manganeso en sangre y cabello. Los resultados del WISC-R, indicaron que los niveles medios de Coeficiente Intelectual (CI) en ambos grupos de exposición estaban por debajo de los niveles esperados (CI 90-110); para grupo expuesto (CI: $75,1 \pm 11,3$, $p < 0.05$) y grupo control (CI: $82,2 \pm 14,7$).³³

Cada vez hay más evidencia que sugiere que el exceso de manganeso en niños, se encuentra asociado con alteraciones neuroconductuales. En Brasil, se investigó la función cognitiva de niños que vivían cerca de una planta de aleación de ferromanganeso, puesto a que se reportaron elevadas concentraciones de Mn en el cabello de estos niños. En este estudio transversal, se administró la prueba de Escala de Inteligencia Wechsler a 83 niños de entre 6 y 12 años, y se midieron las concentraciones de Mn en el cabello (MnH) y sangre (MnB) mediante espectrometría de absorción atómica en horno de grafito (GFAAS). Los resultados evidenciaron que la MnH de los niños se relaciona negativamente con el cociente intelectual (CI) de escala completa y el CI verbal, confirmando que un nivel elevado de MnH en niños se asocia con un menor rendimiento cognitivo, especialmente en el dominio verbal.³⁶

III. Planteamiento del problema de investigación y justificación

Los reportes del MINEDU evidencian que los estudiantes que alcanzan un nivel satisfactorio en su rendimiento académico continúa siendo bajo a nivel nacional. Considerando que los escolares pasan en promedio ocho horas el día en las instituciones educativa, estas constituyen un entorno clave para analizar factores que podrían estar influyendo en su desempeño académico.

Entre estos factores, la exposición a contaminantes atmosféricos ha cobrado creciente interés. En particular, el manganeso (Mn) presente en el material particulado PM10 ha recibido escasa atención, a pesar de que existe evidencia de su capacidad para acumularse en el cerebro y generar déficits cognitivos, lo que podría repercutir negativamente en los procesos de aprendizaje.

Este aspecto adquiere especial relevancia en el contexto peruano, considerado uno de los países con altas concentraciones de material particulado en América Latina. En este

sentido, la presencia de manganeso en PM₁₀ podría constituir un factor de riesgo adicional y poco explorado en niños en edad escolar.

Por ello, el presente estudio se justifica desde una perspectiva científica y de salud pública, ya que busca generar evidencia sobre la posible relación entre la exposición a manganeso en el aire y el rendimiento académico. Los resultados permitirán comprender mejor los factores ambientales que afectan el aprendizaje y contribuirán al diseño de estrategias educativas y sanitarias orientadas a mejorar el desempeño escolar.

IV. Pregunta de investigación

¿Existe asociación entre las concentraciones de manganeso en PM₁₀ y el rendimiento académico de estudiantes de educación de segundo grado de primaria y secundaria en el Perú?

V. Hipótesis

Existe una asociación inversa entre las concentraciones de manganeso en PM₁₀ y el rendimiento académico de estudiantes de educación de segundo grado de primaria y segundo de secundaria en el Perú.

VI. Objetivos

6.1 Objetivo general

Evaluar la relación entre las concentraciones de manganeso en PM₁₀ y el porcentaje de logro satisfactorio en las pruebas de comprensión lectora y en matemática de estudiantes de educación de segundo grado de primaria y segundo de secundaria en el Perú entre el 2007 al 2019.

6.2 Objetivos específicos

- Determinar la correlación estadística entre las concentraciones de manganeso en PM_{10} y el rendimiento académico de los estudiantes de segundo de primaria y segundo de secundaria, entre el 2007 al 2019.
- Evaluar la asociación del manganeso en PM_{10} sobre el rendimiento académico de los estudiantes, ajustando por variables confusoras mediante un modelo de regresión lineal múltiple.

VII. Metodología

7.1 Diseño de estudio

El presente estudio empleó un diseño ecológico, que se basa en el análisis de variables a nivel agregado y no individual. Este enfoque permite evaluar asociaciones entre exposiciones ambientales y desenlaces de interés en grupos poblacionales definidos en el espacio y el tiempo. En este estudio, se analizó la asociación entre las concentraciones promedio anuales de manganeso (Mn) en material particulado PM_{10} y el rendimiento académico de estudiantes de segundo grado de primaria y segundo de secundaria, utilizando como unidad de análisis la combinación departamento-año.

7.2 Población de estudio

La población de estudio estuvo conformada por estudiantes de segundo grado de educación primaria y segundo grado de secundaria pertenecientes a diez departamentos del Perú (Apurímac, Cusco, Ica, Junín, Lima Metropolitana, Lima provincia, Moquegua, Pasco, Ucayali y Áncash), durante el periodo 2007-2019.

7.3 Unidad de análisis

La unidad de análisis empleada en este estudio es la combinación departamento-año. Esto significa que cada registro del conjunto de datos representa un departamento del país en un año determinado, considerando las variables de concentración promedio anual de manganeso en el aire y los indicadores de rendimiento académico correspondientes a ese mismo periodo. De esta manera, el análisis se realiza a nivel

agregado, permitiendo identificar variaciones temporales y espaciales en la relación entre exposición ambiental y desempeño escolar.

Se aplicaron los siguientes criterios de inclusión y exclusión.

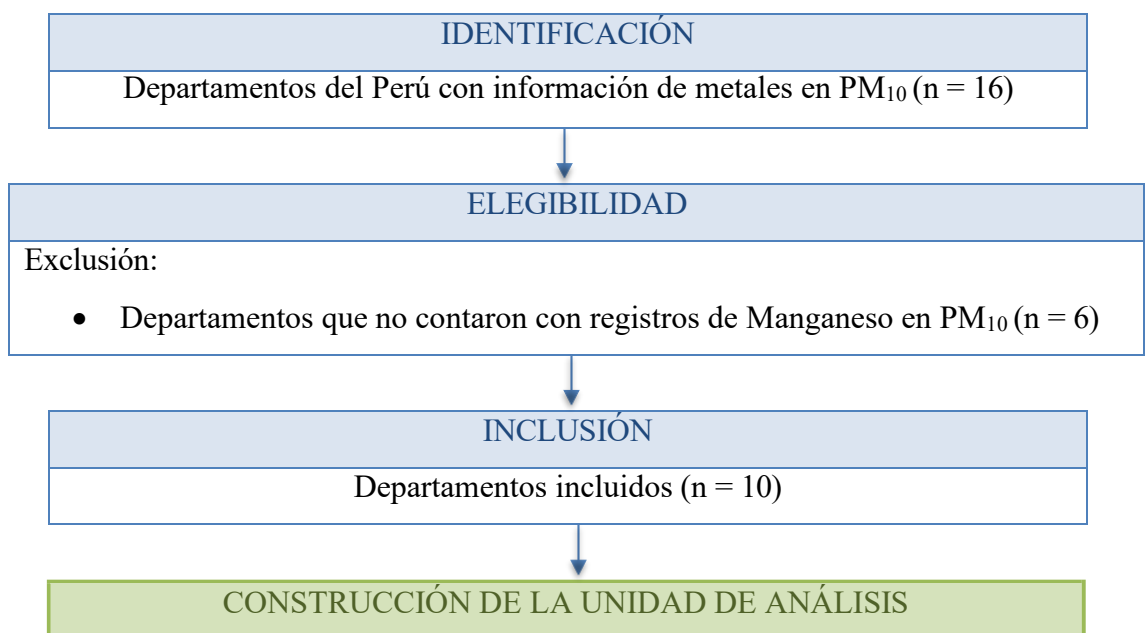
7.3.1 Criterios de inclusión:

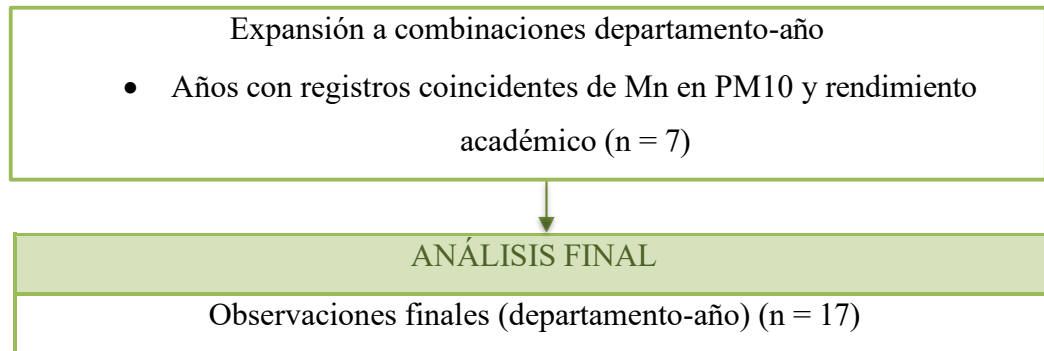
1. Departamentos del Perú que cuentan con datos disponibles de concentraciones de metales en PM_{10} en el periodo 2007–2019.
2. Departamentos que contaron con registros coincidentes de manganeso en PM_{10} y resultados de rendimiento académico durante el periodo 2007–2019. (Se excluyeron los casos en los que la información de ambas fuentes no correspondía a los mismos años o no podía ser vinculada para el análisis ecológico).

7.3.2 Criterios de exclusión:

1. Departamentos que no contaron con registros de Manganeso (Mn) en PM_{10} en el periodo 2007-2019.

Figura 7. Flujograma de construcción de la base de datos y definición de la unidad de análisis





*El número final de observaciones corresponde a la combinación departamento-año, lo que explica la diferencia respecto al número de departamentos incluidos.

7.4 Clasificación de variables y operacionalización

Variable independiente: Concentración de manganeso en PM₁₀ en el aire en ug/m³.

Variable dependiente: Rendimiento académico satisfactorio en porcentaje.

Covariables:

Tasa bruta de matrícula escolar

Tasa neta de matrícula escolar

Tasa neta de asistencia escolar

Tasa bruta de asistencia escolar

Variables confusoras:

Sin acceso a agua por red pública

Asistencia con atraso escolar

Tabla 1. Matriz de Operacionalización de Variables

Variable	Definición		Criterios de medición	Tipo de variable	Fuente
	Conceptual	Operacional			

Concentración de manganeso en PM_{10} en el aire en $\mu g/m^3$	Concentración de manganeso en material particulado menor de diez micrómetros en el aire	Concentración anual promedio del manganeso en material particulado inferior de diez micrómetros en $\mu g/m^3$ unidades a nivel departamental	Cuantitativa Escala: De Razón	Variable independiente	DIGESA
Rendimiento académico satisfactorio	El educando alcanzó aquellos aprendizajes esperados para el lapso en evaluación	Porcentaje de la medida promedio del estudiantado que consiguieron un nivel de logro satisfactorio a nivel departamental	Cuantitativa Escala: De Razón	Variable dependiente	MINEDU
Sin acceso a agua por red pública ³⁷	Sin disponibilidad de agua potable a través de sistemas gestionados por entidades públicas o privadas	Porcentaje poblacional que no consume agua derivada de red pública a nivel departamental	Cuantitativa Escala: De Razón	Variable confusora	INEI
Tasa bruta de matrícula escolar	Matrícula del grupo poblacional en edad escolar a algún nivel o grado de estudios del sistema educativo	Porcentaje de la población escolar matriculados en algún nivel o grado de estudios a nivel departamental	Cuantitativa Escala: De Razón	Covariable	INEI
Tasa neta de matrícula escolar	Matrícula del grupo poblacional en edad reglamentaria al nivel académico que le es correspondiente	Porcentaje de la población estudiantil inscritos en el grado que le es pertinente a nivel departamental	Cuantitativa Escala: De Razón	Covariable	INEI
Tasa neta de asistencia escolar	El estudiante asiste al nivel o año de estudio	Porcentaje de la población estudiantil que	Cuantitativa Escala: De Razón	Covariable	INEI

	pertinente a su edad	asiste al grado o año de estudio que le es pertinente a nivel departamental			
Tasa bruta de asistencia escolar	El estudiante asiste a algún nivel o grado académico del sistema educativo	Porcentaje de la población escolar que asiste a algún nivel o grado académico del sistema educativo	Cuantitativa Escala: De Razón	Covariable	INEI
Asistencia con atraso escolar	El estudiante asiste a un grado o año de estudio inferior para su edad normativa	Porcentaje de población escolar que asiste a un grado o año inferior para su edad	Cuantitativa Escala: De Razón	Variable confusora	INEI

7.5 Obtención de datos

Las concentraciones diarias de manganeso en PM₁₀ en el aire del 2007 al 2019 fue obtenida de la base de datos de Monitoreo de metales pesados en el aire publicada en la página web institucional de la DIGESA.

El rendimiento académico fue obtenido de la Evaluación Muestral de Estudiantes, que es una prueba estandarizada aplicada a una selección representativa de estudiantes para medir logros de aprendizaje de comprensión lectora y matemática de segundo de primaria y secundaria. Los datos corresponden también del 2007 al 2019, el cual se encuentra disponible en la página web institucional del MINEDU.

Se han considerado variables como: Porcentaje de la población sin acceso a agua por red pública del Informe Perú: El informe Formas de Acceso al Agua y Saneamiento Básico, el cual se basa en los datos recopilados a través de la Encuesta Nacional de Programas Presupuestales (ENAPRES), 2013-2019, porcentaje de matrícula escolar (tasa bruta y neta), asistencia escolar (tasa bruta y neta) y asistencia con atraso escolar del Informe Perú: Indicadores de Educación por Departamentos, 2007-2017 y 2009-

2019, todo ello disponible de la página web institucional del Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI).

7.6 Análisis estadístico

La información proveniente de la DIGESA y del MINEDU, correspondiente al periodo 2007–2019, fue organizada y depurada en tablas de Microsoft Excel, con el fin de ordenar los valores por departamento y preparar la base de datos antes de su procesamiento en el software estadístico R.

Con los datos coincidentes, se realizó un análisis descriptivo de las concentraciones de manganeso en PM_{10} en el aire, calculando valores de mediana en 10 departamentos del Perú (Apurímac, Cusco, Ica, Junín, Lima Metropolitana, Lima provincia, Moquegua, Pasco, Ucayali y Áncash). Este análisis se llevó a cabo inicialmente a nivel departamental y posteriormente de forma agrupada según región natural (Costa, Sierra y Selva). Asimismo, para el porcentaje de rendimiento académico satisfactorio por departamento, se calcularon las medianas y se reportaron adicionalmente los resultados de la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis (KW), con el propósito de evaluar diferencias estadísticamente significativas entre regiones.

Luego, se efectuaron análisis bivariados para evaluar la correlación entre las concentraciones de manganeso en PM_{10} y el porcentaje de logro satisfactorio de los estudiantes en matemáticas y comprensión lectora, empleando la correlación de Spearman.

Adicionalmente, se incorporaron variables confusoras y con posible asociación en el rendimiento académico, cuyos datos fueron obtenidos del INEI. Para este fin, se aplicó un análisis de regresión lineal múltiple, el cual se realizó según el área de competencia (Lectura y Matemáticas) y según nivel educativo (Segundo grado de primaria y segundo grado de secundaria).

En todos los análisis, se consideró un nivel de significancia estadística de $p < 0.05$.

7.6.1 Análisis estadístico descriptivo

Se realizó un gráfico de serie de tiempo para visualizar los datos de las concentraciones de manganeso para cada departamento, en dónde la DIGESA realiza el monitoreo de Mn en PM₁₀ en el aire, a fin de caracterizar su comportamiento en el periodo 2007 al 2019. Asimismo, se obtuvieron los valores de las medianas.

De igual forma, para los resultados de rendimiento académico (porcentaje de logro satisfactorio en comprensión lectora y matemáticas), se calculó la mediana, que permite observar la distribución y variabilidad de los puntajes por departamento y año. Adicionalmente, se aplicó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis (KW) para evaluar posibles diferencias estadísticamente significativas entre grupos, particularmente según departamento.

Este análisis descriptivo proporcionó una primera aproximación a la magnitud y variación de las variables principales antes de la aplicación de los análisis bivariados y multivariados.

7.6.2 Análisis estadístico bivariado

Con el propósito de explorar la relación entre la exposición ambiental y el rendimiento académico, se realizaron análisis bivariados entre las concentraciones de manganeso en PM₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) y el porcentaje de logro satisfactorio obtenido por los estudiantes en las pruebas de matemáticas y comprensión lectora.

Previo a la selección de la prueba de correlación, se evaluó la distribución de los datos mediante la prueba de normalidad de Shapiro–Wilk, dado que la población de estudio estuvo conformada por menos de 50 unidades de análisis (departamentos-años), siendo esta prueba la más adecuada por su mayor poder estadístico en muestras pequeñas y se determinó que correspondía emplear una prueba de correlación no paramétrica.

Por ello, se utilizó la correlación de Spearman (ρ), la cual permitió estimar la dirección y la fuerza de la asociación entre las concentraciones de manganeso en PM_{10} y el rendimiento académico. Se consideró un nivel de significancia estadística de $p < 0.05$.

Adicionalmente, se elaboraron gráficos de dispersión con el fin de visualizar la tendencia y el patrón de asociación entre ambas variables, permitiendo complementar el análisis numérico con una representación gráfica de la relación observada.

El análisis se realizó en dos etapas: en primer lugar, se evaluó la correlación a nivel nacional; posteriormente, se repitió el procedimiento agrupando los departamentos según su pertenencia a las regiones Costa, Sierra y Selva, con el fin de identificar posibles diferencias en la magnitud y dirección de la relación según el contexto geográfico.

7.6.3 Análisis estadístico de Regresión lineal múltiple

Con el fin de evaluar la asociación del manganeso en PM_{10} sobre el rendimiento académico de los estudiantes, ajustando por variables confusoras, se aplicó un modelo de regresión lineal múltiple. Se incluyeron como variables confusoras diversos indicadores relacionados con el contexto educativo y el acceso a servicios básicos, como la disponibilidad de agua potable, con el propósito de controlar su posible influencia sobre la variable dependiente. El modelo permitió precisar la magnitud real de dicha relación.

Previamente, se evaluó el modelo mediante de colinealidad entre las variables predictoras, utilizando el factor de inflación de la varianza (VIF). Los resultados, presentados en la tabla correspondiente (Tabla 5), permitieron identificar variables con altos niveles de colinealidad, las cuales fueron consideradas para su exclusión, con el fin de asegurar la estabilidad, la parsimonia y la validez del modelo final.

Posteriormente, se evaluó la calidad del ajuste del modelo a través del coeficiente de determinación R^2 y el R^2 ajustado, los cuales permiten conocer la proporción de variabilidad explicada y corregir el ajuste por el número de predictores.

Asimismo, se verificó el cumplimiento del supuesto de independencia de los errores mediante la prueba de Durbin–Watson. De este modo, se evaluó la posible presencia de autocorrelación en los residuos, contribuyendo a la validez de las inferencias del modelo de regresión lineal.

Posteriormente, el VIF fue recalculado de manera específica para cada uno de los modelos de regresión lineal múltiple desarrollados (lectura en primaria, lectura en secundaria, matemáticas en primaria y matemáticas en secundaria), con el objetivo de verificar la ausencia de multicolinealidad significativa en cada análisis particular.

Finalmente, se estimaron los coeficientes Beta, que expresan el cambio esperado en el rendimiento académico ante una variación unitaria de cada variable independiente, manteniendo constantes las demás variables del modelo.

Se consideraron también los valores p y los intervalos de confianza al 95% para establecer la significancia estadística, tomando como referencia un nivel de $p < 0.05$.

7.7 Consideraciones éticas

El presente estudio tiene la aprobación del Comité Institucional de Ética e Investigación (CIEI) de la Universidad Peruana Cayetano Heredia, bajo el código SIDISI N° 215521, siendo clasificado como EXENTO el 21 de septiembre de 2024. Asimismo, se precisa que la base de datos y los productos derivados del estudio han sido debidamente almacenados y resguardados por la investigadora responsable.

XIII. Resultados

8.1 Características generales descriptivas

Se describen las concentraciones de manganeso en PM_{10} en el aire a nivel departamental y regional, utilizando medidas de tendencia central. Los resultados, resumidos en la Tabla 2, muestran diferencias tanto en los valores promedio como en la variabilidad del

contaminante entre los departamentos analizados, lo que permite obtener una visión general de su distribución a escala departamental y por región.

Tabla 2. Características descriptivas: Mediana de manganeso en PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) en el aire por departamento entre el 2007 - 2019.

Región	Departamento	n	Observación 1	Observación 2	Observación 3	Mediana
	Ica	2	0.0182	0.0315	—	0.0248
Costa	Lima Metropolitana	1	0.0293	—	—	—
	Lima provincia	1	0.125	—	—	—
	Moquegua	2	0.0204	0.041	—	0.0307
Sierra	Apurímac	1	0.0445	—	—	—
	Cusco	1	0.0458	—	—	—
	Junín	3	0.0137	0.0189	0.0217	0.0189
	Pasco	2	0.0576	0.0627	—	0.0601
	Áncash	3	0.0083	0.0113	0.0171	0.0113
Selva	Ucayali	1	0.0162	—	—	—

n = departamento-año, Mediana = medida de tendencia central.

Elaboración propia. Fuente: DIGESA

A su vez, se elaboró el gráfico de serie de tiempo, con el propósito de evaluar la evolución anual de las concentraciones de manganeso en PM10. Este gráfico facilitó la identificación de posibles tendencias en determinados años, así como la comparación del comportamiento temporal entre departamentos.

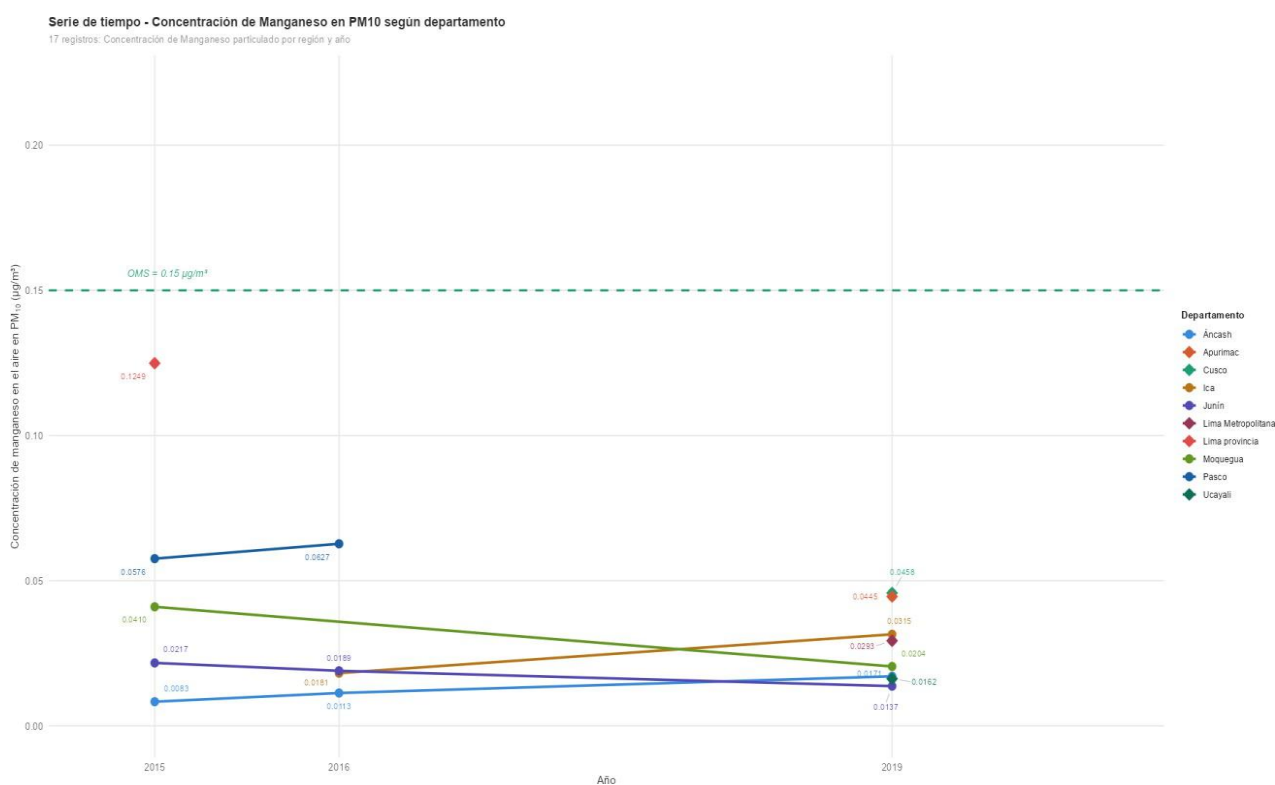


Figura 8. Gráfico de serie de tiempo de la Concentración promedio anual de Manganeso en el aire en PM10 según departamento.

La Figura 8 muestra que las concentraciones de manganeso en PM₁₀ varían entre los departamentos evaluados, alcanzando un valor máximo de 0,1249 µg/m³ en Lima provincia, seguido de Pasco, que registra valores relativamente elevados en 2015 (0,0576 µg/m³) y 2016 (0,0627 µg/m³). Para el año 2019, los valores más altos corresponden a Cusco (0,0458 µg/m³) y Apurímac (0,0445 µg/m³), mientras que otros departamentos presentan concentraciones menores. En general, todas las concentraciones registradas se encuentran por debajo del valor guía anual de 0,15 µg/m³ establecido por la Organización Mundial de la Salud (OMS) para manganeso en aire, lo que sugiere niveles relativamente bajos de exposición crónica en los departamentos evaluados.³⁸ No obstante, estos resultados deben interpretarse con cautela, considerando la variabilidad espacial y temporal observada.

Por otro lado, en la Tabla 4, se presentan las medianas de los porcentajes de estudiantes de segundo grado de primaria y segundo de secundaria que alcanzaron un nivel de logro satisfactorio en las pruebas de Lectura y Matemática, desagregados por

departamento. Asimismo, se reportan los resultados de la prueba no paramétrica de Kruskal–Wallis (KW), empleada para evaluar la existencia de diferencias estadísticas entre los departamentos.

Tabla 3. Características descriptivas: Medianas del porcentaje de estudiantes que alcanzaron un nivel de logro satisfactorio por departamento del 2007-2019.

Elaboración propia. Fuente: MINEDU

Departamento	n	Lectura <u>primaria</u> Mediana	Lectura <u>secundaria</u> Mediana	Matemática <u>primaria</u> Mediana	Matemática <u>secundaria</u> Mediana
Apurímac	1	39.600	7.400	21.670	10.510
Cusco	1	42.400	11.700	21.300	16.090
Ica	2	47.300	15.490	31.250	16.650
Junín	3	47.800	13.980	32.200	15.490
Lima Metropolitana	1	44.900	22.530	18.050	24.910
Lima provincia	1	54.300	14.270	27.800	9.970
Moquegua	2	63.000	25.810	35.600	25.600
Pasco	2	45.950	10.210	32.600	10.070
Ucayali	1	17.900	4.830	6.800	4.740
Áncash	3	37.300	10.650	24.600	8.980
p (Kruskal-Wallis)		0.189	0.087	0.330	0.159

Se observa que, las medianas del rendimiento varían entre departamentos, destacando en primaria, Moquegua con los valores más altos (63% en Lectura y 35.6% en Matemáticas); mientras que, Ucayali presenta los valores más bajos (17.9% en Lectura y 6.8% en Matemáticas).

En secundaria, los valores más altos corresponden nuevamente a Moquegua (25.810% en Lectura y 1.7% en Lectura), y al igual que en primaria, Ucayali presenta los valores más bajos (4.74% en Matemáticas y 4.83% en Lectura).

Sin embargo, en términos generales, los valores de p obtenidos de la prueba de Kruskal-Wallis, indican que estas diferencias no son estadísticamente significativas en los valores entre departamentos para las áreas y niveles analizados.

8.2 Correlación estadística entre las concentraciones de manganeso en PM10 y el rendimiento académico de los estudiantes de segundo de primaria y segundo de secundaria, entre el 2007 al 2019

Se evaluaron los supuestos de normalidad de las variables de estudio mediante la prueba de Shapiro–Wilk. Los resultados se presentan de manera gráfica en la Figura 9 y muestran que algunas variables no cumplen con el supuesto de normalidad ($p < 0.05$), mientras que otras presentan una distribución aproximadamente normal ($p > 0.05$). Estos hallazgos orientaron la selección de las pruebas estadísticas empleadas en el análisis.

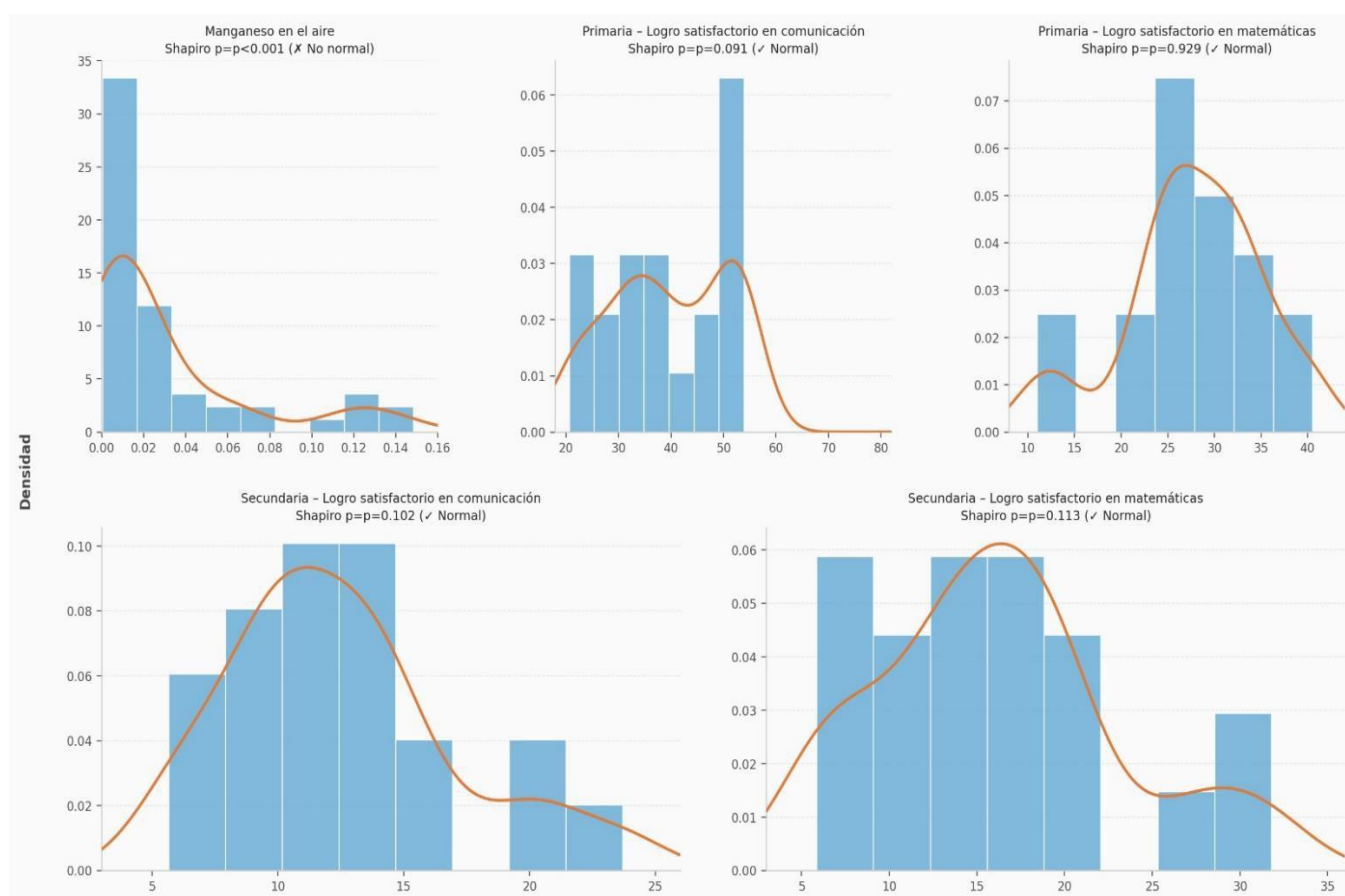


Figura 9. Prueba de Normalidad

En un primer análisis, se evaluó la correlación entre las concentraciones de manganeso en PM10 en el aire y el porcentaje de rendimiento académico satisfactorio a nivel nacional. La Figura 10, muestra que, en educación primaria, existe una correlación positiva pero débil tanto en lectura ($\rho = 0,427$; $p = 0,0876$) como en matemáticas ($\rho = 0,245$; $p = 0,3427$). No obstante, estas asociaciones no alcanzan significancia

estadística. En educación secundaria, la relación es prácticamente inexistente en lectura ($\rho = 0,012$; $p = 0,9661$) y débilmente negativa en matemáticas ($\rho = -0,074$; $p = 0,7802$), también sin significancia estadística.

En conjunto, estos resultados sugieren que no se observa una relación estadísticamente significativa entre la concentración de manganeso en PM10 y el rendimiento académico a nivel nacional.

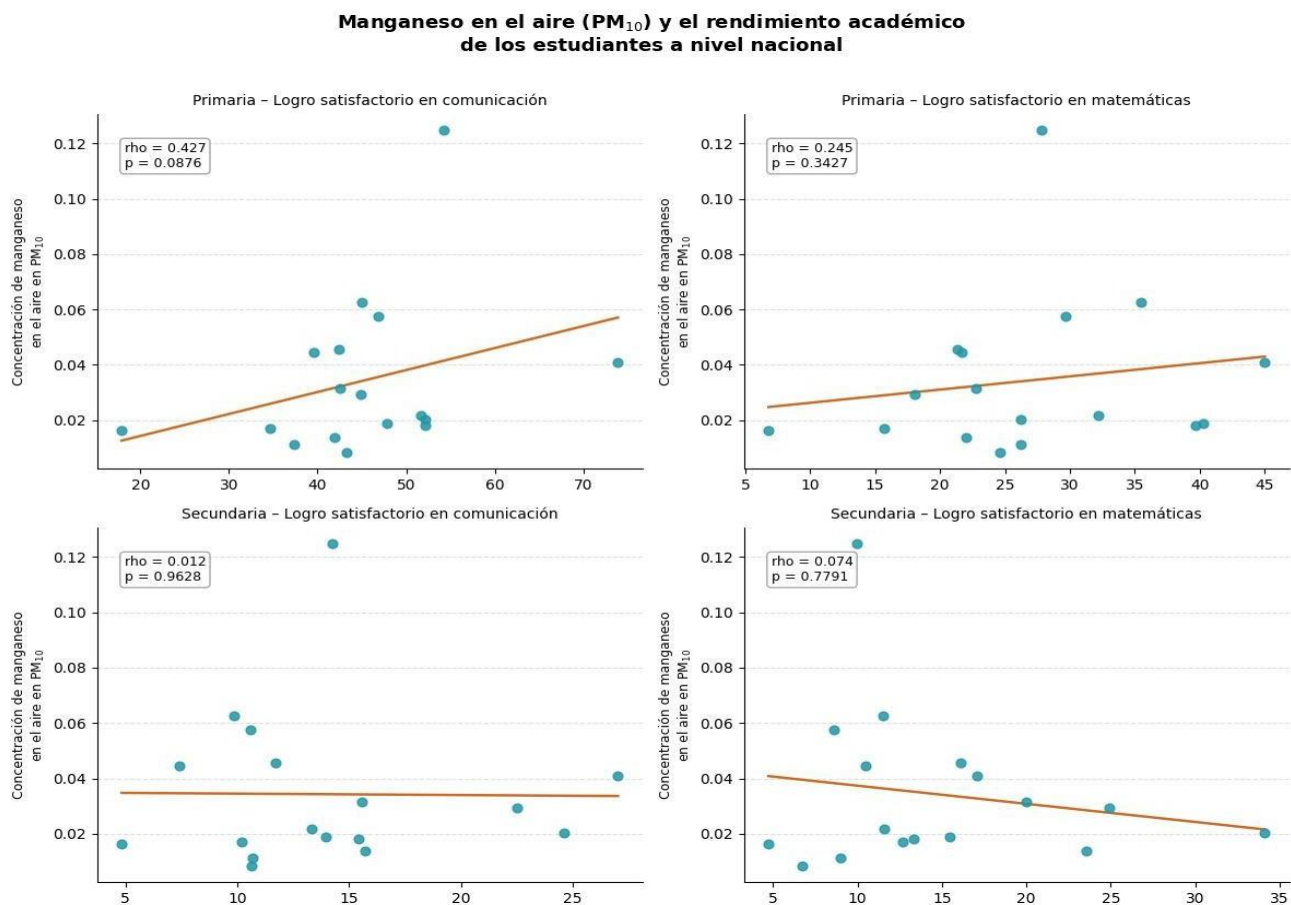


Figura 10. Gráficos de dispersión entre las concentraciones de manganeso en PM10 y el rendimiento académico de los estudiantes a nivel nacional del 2007 al 2019

En la Costa, el análisis de correlación muestra resultados variables entre las concentraciones de manganeso (Mn) en el aire y el rendimiento académico. (Figura 11)

En educación primaria se observa una correlación positiva moderada en lectura ($\rho = 0,406$; $p = 0,425$) y una correlación positiva débil en matemáticas ($\rho = 0,143$; $p = 0,803$), aunque en ambos casos las asociaciones no son estadísticamente significativas. En educación secundaria, la correlación es negativa muy débil en lectura ($\rho = -0,006$; $p = 0,919$) y negativa moderada en matemáticas ($\rho = -0,429$; $p = 0,419$), también sin significancia estadística. En tal sentido, los resultados indican que no se evidencia una relación significativa entre las concentraciones de manganeso en PM10 y el rendimiento académico en la Costa.

Manganeso en el aire (PM₁₀) y el rendimiento académico de los estudiantes – Región Costa

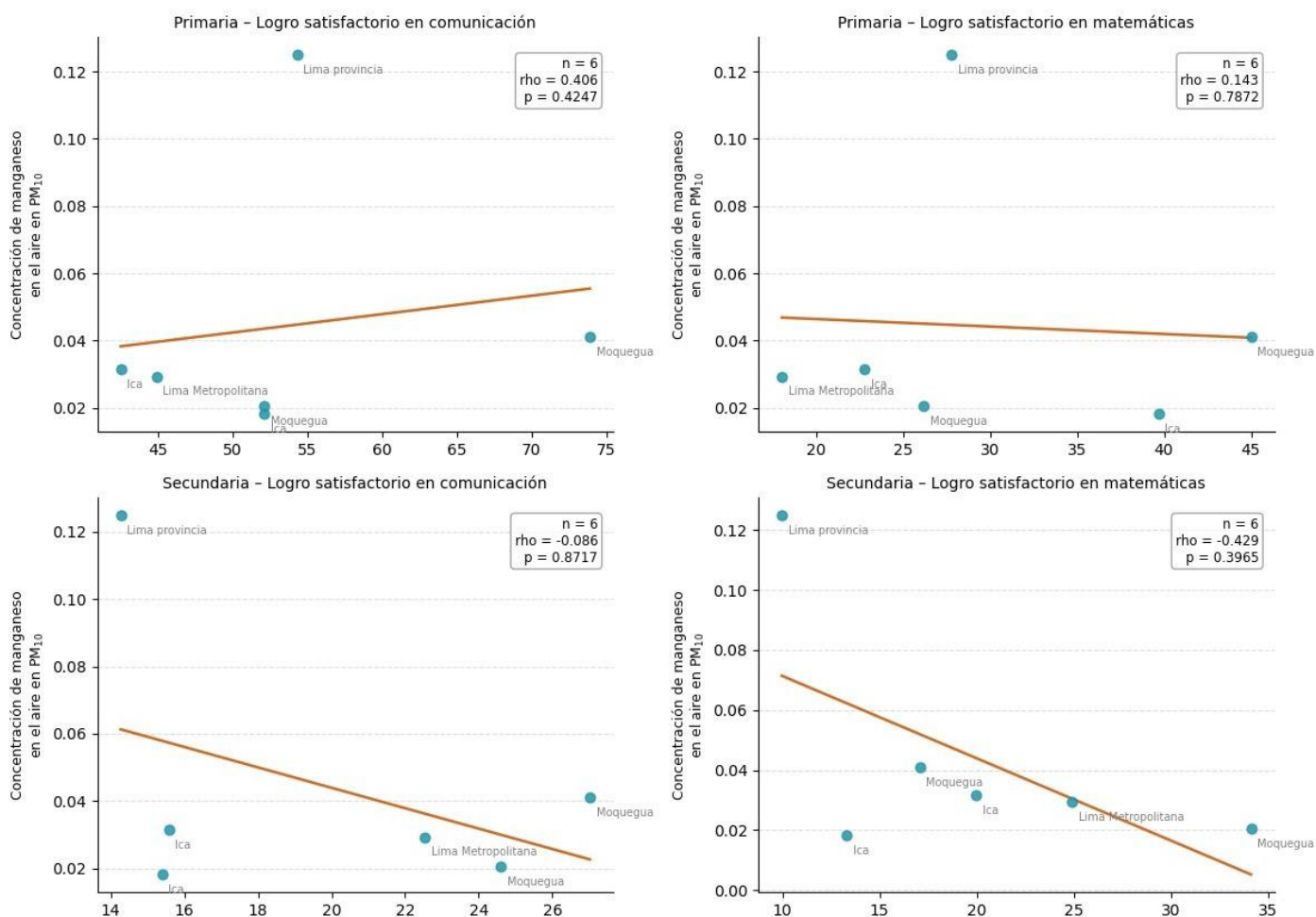


Figura 11. Gráficos de dispersión entre las concentraciones de manganeso en PM₁₀ y el rendimiento académico de los estudiantes en la Costa del 2007 al 2019

En la región de la Sierra (Figura 12), los resultados indicaron que en educación primaria existe una correlación positiva moderada entre la concentración de manganeso (Mn) en PM_{10} y el logro satisfactorio en lectura ($\rho = 0,382$; $p = 0,279$), así como una correlación positiva débil en matemáticas ($\rho = 0,224$; $p = 0,537$). En educación secundaria, se observa una correlación negativa moderada en lectura ($\rho = -0,382$; $p = 0,279$) y una correlación positiva muy débil en matemáticas ($\rho = 0,079$; $p = 0,838$). No obstante, en todos los casos los valores de p son mayores a 0,05, lo que indica que no se evidencia una relación estadísticamente significativa entre la concentración de manganeso en PM_{10} y el rendimiento académico en la Sierra.

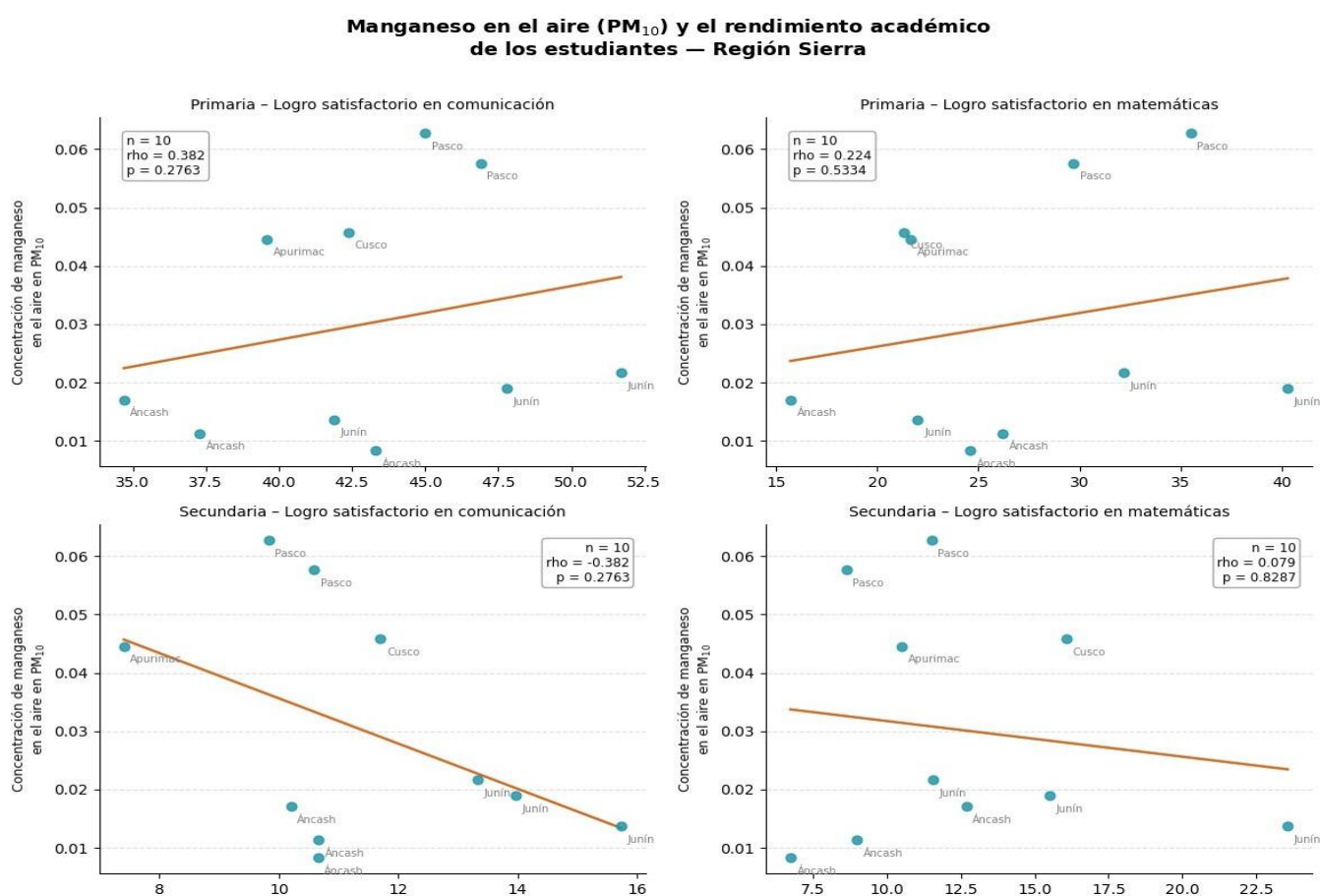


Figura 12. Gráficos de dispersión entre las concentraciones de manganeso en PM_{10} y el rendimiento académico de los estudiantes en la Sierra del 2007 al 2019

Finalmente, en la Selva, no se realizó el análisis de correlación debido a la limitada disponibilidad de datos ($n = 1$), lo que no permite aplicar pruebas estadísticas ni obtener conclusiones válidas.

8.3 Análisis de Regresión lineal múltiple

Se evaluó el modelo de regresión lineal múltiple mediante el análisis de colinealidad, utilizando el factor de inflación de la varianza (VIF). Los resultados, presentados en la tabla correspondiente, permitieron identificar variables con altos niveles de colinealidad, las cuales se consideraron para su exclusión con el fin de asegurar la estabilidad, la parsimonia y la validez del modelo final.

Tabla 4. Factores de inflación de la varianza (VIF) del modelo de regresión

Variable	VIF
Concentración de manganeso en PM ₁₀ en el aire en ug/m ³	108.71
Sin acceso a agua por red pública	1143.70
Tasa bruta de matrícula escolar en primaria	1454.68
Tasa bruta de matrícula escolar en secundaria	189.75
Tasa neta de matrícula escolar en primaria	13 923.96
Tasa neta de matrícula escolar en secundaria	923.04
Tasa neta de asistencia escolar en primaria	13 135.47
Tasa neta de asistencia escolar en secundaria	1066.38
Tasa bruta de asistencia escolar en primaria	1906.43
Tasa bruta de asistencia escolar en secundaria	236.83
Asistencia con atraso escolar en primaria	6.58
Asistencia con atraso escolar en secundaria	3.61

8.3.1 Análisis de regresión lineal múltiple para rendimiento en Lectura en estudiantes de primaria

Se llevó a cabo un análisis de regresión lineal múltiple para explicar el rendimiento en Lectura de estudiantes de primaria, considerando únicamente la variable de porcentaje de asistencia con atraso escolar en primaria, luego de depurar el modelo por problemas de colinealidad. Las métricas de ajuste muestran un desempeño adecuado del modelo ($R^2 = 0.682$; R^2 ajustado = 0.609). (Tabla 6)

Tabla 5. Métricas de ajuste del Rendimiento académico en Lectura de primaria

n	R²	R² ajustado
17	0.682	0.609

La verificación de los supuestos del modelo para el rendimiento académico en Lectura en primaria incluyó la prueba de Durbin–Watson, cuyos resultados se presentan en la tabla correspondiente. El valor obtenido (1.33) y su nivel de significancia ($p = 0.126$) indican que no se evidencia autocorrelación de los residuos, por lo que se cumple el supuesto de independencia y se respalda la validez del modelo estimado. (Tabla 7)

Tabla 6. Verificación de supuestos del Rendimiento académico en Lectura de primaria

Prueba	Estadístico	p
Durbin–Watson	1.33	0.126

La colinealidad del modelo de regresión para el rendimiento en Lectura en primaria se evaluó mediante el factor de inflación de la varianza (VIF). Los resultados indican que las variables incluidas en el modelo presentan valores de VIF inferiores a 2, lo que sugiere la ausencia de problemas relevantes de multicolinealidad. En este sentido, las variables Concentración de manganeso en el aire y Porcentaje de asistencia con atraso escolar, muestran niveles aceptables de independencia entre sí, respaldando la estabilidad y validez del modelo estimado. (Tabla 8)

Tabla 7. VIF (multicolinealidad) del modelo de regresión para el rendimiento de Lectura en primaria

Variable	VIF
Concentración de manganeso en PM ₁₀ en el aire en ug/m ³	1.97
Asistencia con atraso escolar en primaria	1.54

Se presentan las estimaciones de los parámetros del modelo de regresión lineal múltiple aplicado al rendimiento académico en Lectura de estudiantes de segundo grado de primaria. Los resultados indican que la variable Porcentaje de asistencia con atraso

escolar en primaria se encuentra significativamente asociado de manera inversa con el rendimiento ($B = -2.04$; $p < 0.001$). En contraste, la Concentración de manganeso en PM10 no mostró una asociación estadísticamente significativa en el modelo ajustado. Por lo que, en conjunto el modelo evidencia que, únicamente la variable de Porcentaje de asistencia con atraso escolar contribuye de manera significativa a la variabilidad del rendimiento en Lectura. (Tabla 9)

Tabla 8. Estimación de los parámetros de regresión sobre la variable dependiente (Rendimiento académico en Lectura en Segundo de primaria)

Predictor	B	p	IC 95% [LI, LS]
Intercepto	129.75	< .001	[84.87, 174.63]
Concentración de manganeso en PM ₁₀ en el aire en ug/m ³	-145.11	0.119	[-332.87, 42.65]
Asistencia con atraso escolar en primaria	-2.04	< .001	[-2.96, -1.12]

8.3.2 Análisis de regresión lineal múltiple para rendimiento en Matemática en estudiantes de primaria

Se llevó a cabo un análisis de regresión lineal múltiple para el rendimiento en Matemática en estudiantes de primaria, utilizando el modelo previamente depurado. Las métricas de ajuste en la Tabla 10, muestran una capacidad explicativa moderada ($R^2 = 0.425$; R^2 ajustado = 0.292).

Tabla 9. Métricas de ajuste del Rendimiento académico en Matemáticas de primaria

n	R ²	R ² ajustado
17	0.425	0.292

Se verificaron los supuestos del modelo para el rendimiento académico en Matemática en primaria mediante el estadístico de Durbin–Watson. El valor obtenido ($D-W = 2.09$; $p = 0.98$) indica ausencia de autocorrelación de los residuos, por lo que se cumple el supuesto de independencia, lo que respalda la validez del modelo desde el punto de vista de los supuestos estadísticos. (Tabla 11)

Tabla 10. Verificación de supuestos del Rendimiento académico en Matemáticas de primaria

Estadístico D-W	p
2.09	0.98

Se evaluó la multicolinealidad del modelo de regresión para el rendimiento en Matemática en primaria mediante el factor de inflación de la varianza (VIF). Los valores obtenidos se ubicaron por debajo del umbral crítico, lo que indica la ausencia de problemas de multicolinealidad entre las variables incluidas y confirma la adecuada especificación del modelo. (Tabla 12)

Tabla 11. VIF (multicolinealidad) del modelo de regresión para el rendimiento de Matemáticas en primaria

Variable	VIF
Concentración de manganeso en PM ₁₀ en el aire en ug/m ³	1.97
Asistencia con atraso escolar	1.54

Se presentan las estimaciones de los parámetros del modelo de regresión lineal múltiple para el rendimiento académico en Matemática en estudiantes de segundo grado de primaria. Los resultados, resumidos en la Tabla 13, muestran que la variable Asistencia con atraso escolar en primaria se asocia de manera negativa y estadísticamente significativa con el rendimiento académico, mientras que la Concentración de manganeso en el aire (ug/m³) no muestra una asociación estadísticamente significativa con la variable dependiente en el modelo ajustado.

Tabla 12. Estimación de los parámetros de regresión sobre la variable dependiente (Rendimiento académico en Matemáticas en Segundo de primaria)

Predictor	B	p	IC 95% [LI, LS]
Intercepto	79.76	0.005	[27.96, 131.55]
Concentración de manganeso en PM ₁₀ en el aire en ug/m ³	-113.73	0.277	[-330.40, 102.95]
Asistencia con atraso escolar en primaria	-1.47	0.01	[-2.53, -0.41]

8.3.3 Análisis de regresión lineal múltiple para rendimiento en Lectura en estudiantes de secundaria

Se presentan las métricas de ajuste del modelo de regresión lineal múltiple aplicado al rendimiento académico en Lectura en estudiantes de secundaria. Los resultados, resumidos en la tabla correspondiente, incluyen los valores de R^2 y R^2 ajustado para el modelo estimado. (Tabla 14)

Tabla 13. Métricas de ajuste del Rendimiento académico en Lectura de secundaria

n	R^2	R^2 ajustado
17	0.334	0.18

Se verificaron los supuestos del modelo de regresión para el rendimiento académico en Lectura en estudiantes de secundaria mediante el estadístico de Durbin–Watson. El valor obtenido ($D-W = 1.09$; $p = 0.044$) evidencia la presencia de autocorrelación positiva de los residuos, de acuerdo con los resultados presentados en la tabla correspondiente. (Tabla 15)

Tabla 14. Verificación de supuestos del Rendimiento académico en Lectura de secundaria

Estadístico D–W	p
1.09	0.044

Se evaluó la multicolinealidad del modelo de regresión para el rendimiento académico en Lectura en estudiantes de secundaria mediante el factor de inflación de la varianza (VIF). Los resultados indican valores de VIF de 1.97 para Concentración de manganeso en el aire y 1.36 para el Porcentaje de asistencia con atraso escolar en secundaria, lo que refleja bajos niveles de multicolinealidad entre las variables incluidas en el modelo. (Tabla 16)

Tabla 15. VIF (multicolinealidad) del modelo de regresión para el rendimiento de Lectura en secundaria

Variable	VIF
Concentración de manganeso en PM_{10} en el aire en $\mu g/m^3$	1.97

Se presentan las estimaciones de los parámetros del modelo de regresión lineal múltiple para el rendimiento académico en Lectura en estudiantes de segundo grado de secundaria. Los resultados muestran que ni la Concentración de manganeso en el aire ($p=0.097$), ni la variable Asistencia con atraso escolar en secundaria ($p = 0.203$) muestran una asociación estadísticamente significativa con la variable dependiente en el modelo ajustado. Asimismo, el intercepto resultó estadísticamente significativo ($B = 52.89$; $p = 0.005$). (Tabla 17)

Tabla 16. Estimación de los parámetros de regresión sobre la variable dependiente (Rendimiento académico en Lectura en Segundo de secundaria)

Predictor	B	p	IC 95% [LI, LS]
Intercepto	52.89	0.005	[18.73, 87.06]
Concentración de manganeso en PM_{10} en el aire en ug/m^3	-118.43	0.097	[-261.36, 24.50]
Asistencia con atraso escolar en secundaria	-0.5	0.203	[-1.31, 0.31]

8.3.4 Análisis de regresión lineal múltiple para rendimiento en Matemáticas en estudiantes de secundaria

Por último, se presentan las métricas de ajuste del modelo de regresión lineal múltiple para el rendimiento académico en Matemática en estudiantes de secundaria. Los resultados muestran un valor de $R^2 = 0.119$ y un R^2 ajustado = -0.084 , detallado en la Tabla 18.

Tabla 17. Métricas de ajuste del Rendimiento académico en Matemáticas de secundaria

n	R^2	R^2 ajustado
17	0.119	-0.084

Se verificaron los supuestos del modelo de regresión para el rendimiento académico en Matemática en estudiantes de secundaria mediante el estadístico de Durbin–Watson. El

valor obtenido ($D-W = 1.64$; $p = 0.368$) indica la ausencia de autocorrelación significativa de los residuos, de acuerdo con los resultados presentados en la tabla correspondiente. (Tabla 19)

Tabla 18. Verificación de supuestos del Rendimiento académico en Matemáticas de secundaria

Estadístico D-W	p
1.64	0.368

Se evaluó la multicolinealidad del modelo de regresión para el rendimiento académico en Matemática en estudiantes de secundaria mediante el factor de inflación de la varianza (VIF). Los resultados muestran valores de VIF de 1.97 para Concentración de manganeso en el aire y 1.36 para Porcentaje de asistencia con atraso escolar en secundaria, lo que indica bajos niveles de multicolinealidad entre las variables incluidas en el modelo. (Tabla 20)

Tabla 19. VIF (multicolinealidad) del modelo de regresión para el rendimiento de Matemáticas en secundaria

Variable	VIF
Concentración de manganeso en PM_{10} en el aire en $\mu g/m^3$	1.97
Asistencia con atraso escolar en secundaria	1.36

Se presentan las estimaciones de los parámetros del modelo de regresión lineal múltiple para el rendimiento académico en Matemática en estudiantes de segundo grado de secundaria. Los resultados indican que ni el intercepto ($B = 35.82$; $p = 0.143$) ni las variables Concentración de manganeso en el aire ($B = -100.74$; $p = 0.313$) y Asistencia con atraso escolar ($B = -0.62$; $p = 0.272$) muestran asociación estadísticamente significativos sobre la variable dependiente, de acuerdo con los valores reportados en la Tabla 21.

Tabla 20. Estimación de los parámetros de regresión sobre la variable dependiente (Rendimiento académico en Matemáticas en Segundo de secundaria)

Predictor	B	p	IC 95% [LI, LS]
Intercepto	35.82	0.143	[-13.77, 85.41]
Concentración de manganeso en PM ₁₀ en el aire en ug/m ³	-100.74	0.313	[-308.20, 106.72]
Asistencia con atraso escolar en secundaria	-0.62	0.272	[-1.79, 0.55]

A manera de resumen, se presenta la Tabla 21.

Tabla 21. Resumen de los modelos de regresión lineal múltiple de rendimiento académico de niños de primaria y secundaria.

Variable	Lectura Primaria B [IC95%]	p-valor	Matemática Primaria B [IC95%]	p-valor
Intercepto	129.75 [84.87, 174.63]	<0.001	79.76 [27.96, 131.55]	0.005
Mn en PM₁₀ (µg/m³)	-145.11 [-332.87, 42.65]	0.119	-113.73 [-330.40, 102.95]	0.277
Asistencia con atraso escolar (%)	-2.04 [-2.96, -1.12]	<0.001	-0.50 [-2.53, -0.41]	0.01

Variable	Lectura Secundaria B [IC95%]	p-valor	Matemática Secundaria B [IC95%]	p-valor
Intercepto	52.89 [18.73, 87.06]	0.005	35.82 [-13.77, 85.41]	0.143
Mn en PM₁₀ (µg/m³)	-118.43 [-261.36, 24.50]	0.097	-100.74 [-308.20, 106.72]	0.313
Asistencia con atraso escolar (%)	-0.50 [-1.31, 0.31]	0.203	-0.62 [-1.79, 0.55]	0.272

En resumen, en el análisis multivariado los elevados valores del factor de inflación de la varianza (VIF) observados en el modelo inicial responden a la naturaleza estructural de las variables incluidas, las cuales corresponden a indicadores educativos derivados de fuentes oficiales y presentan alta correlación entre sí (por ejemplo, tasas de matrícula y asistencia). Este fenómeno es esperado en análisis ecológicos donde múltiples variables representan dimensiones similares de un mismo constructo socioeducativo. Para mitigar este problema, se procedió a la depuración del modelo mediante la exclusión de variables con colinealidad extrema, priorizando la estabilidad y parsimonia del modelo final.

Por otro lado, no se emplearon métodos automatizados de selección de variables, como procedimientos stepwise, backward o criterios basados en AIC/BIC, debido al reducido tamaño muestral, el cual podría generar modelos inestables y sobreajustados. En su lugar, se optó por un enfoque teórico-epidemiológico, priorizando la inclusión de variables con plausibilidad conceptual como factores asociados al rendimiento académico. Esta estrategia permitió una mejor interpretación de los resultados y redujo el riesgo de seleccionar modelos espurios derivados de la variabilidad muestral.

IX. Discusiones

La serie de tiempo de las concentraciones de manganeso en PM₁₀ evidenció variaciones entre los departamentos evaluados a lo largo del periodo de estudio. El valor más alto se registró en Lima provincia en el año 2015 (0,1249 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), seguido por el departamento de Pasco, que presentó concentraciones relativamente elevadas en 2015 (0,0576 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) y 2016 (0,0627 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Asimismo, para el año 2019, los mayores valores correspondieron a Cusco (0,0458 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) y Apurímac (0,0445 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), mientras que otros departamentos mostraron concentraciones menores. Al contrastar los resultados con valores guía de exposición crónica como el de la Organización Mundial de la Salud (OMS), que establece un valor de referencia anual de 0,15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para manganeso en PM₁₀, basado en efectos neurológicos asociados a la exposición prolongada, se observa que las concentraciones encontradas se encuentran por debajo de dicho umbral recomendado.³⁸ No obstante, estos niveles, aunque relativamente bajos, podrían representar un riesgo potencial en escenarios de exposición crónica y acumulativa a lo largo del tiempo, especialmente en poblaciones vulnerables.

La evidencia científica señala que incluso exposiciones a bajas concentraciones de manganeso pueden generar trastornos neurológicos y un riesgo para la función cognitiva en poblaciones vulnerables, lo que resalta la importancia de continuar con la vigilancia ambiental de este metal. Lo cual se evidencia con lo señalado por Solís-Vivanco R. et al. (2009), quienes identificaron mediante pruebas neuropsicológicas para la función cognitiva (estado cognitivo general, atención, fluidez semántica y fonológica, construcción, memoria verbal, codificación y recuperación de la memoria visual, y depresión), deterioros en la atención de comunidades cercanas a plantas de manganeso en Molango, México, a partir de una exposición de 0,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.¹⁸ Tales hallazgos refuerzan la

necesidad de revisar las políticas de control ambiental y los valores de referencia normativos para Mn, considerando su potencial neurotóxico incluso en escenarios de baja exposición.

Estas diferencias territoriales reflejan la posible influencia de fuentes locales de emisión, como actividades industriales, mineras u hogares en los que se cocina con combustible contaminante, como la leña, el carbón, la bosta y el estiércol, los cuales al ser utilizados para cocinar o calefaccionar, liberan una variedad de contaminantes peligrosos, entre ellos monóxido de carbono (CO), dióxido de azufre (SO₂), dióxido de nitrógeno (NO₂), material particulado (PM), hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) y compuestos orgánicos volátiles (COVs), todos ellos con efectos nocivos comprobados para la salud.³⁹ Evidenciándose la heterogeneidad de la exposición ambiental en el país.

En el análisis bivariado, no se encontró una asociación estadísticamente significativa entre las concentraciones de manganeso en PM₁₀ y el rendimiento académico, tanto a nivel nacional como por regiones. Si bien se observaron correlaciones negativas de baja magnitud en algunos casos —a nivel nacional en educación secundaria en matemáticas ($\rho = -0,074$; $p = 0,7802$), y a nivel regional en la Costa en educación secundaria en lectura ($\rho = -0,006$; $p = 0,919$) y matemáticas ($\rho = -0,429$; $p = 0,419$), así como en la Sierra en educación secundaria en lectura ($\rho = -0,382$; $p = 0,279$)—, estas no alcanzaron significancia estadística. En conjunto, estos resultados sugieren que, en los niveles de exposición observados, el manganeso en PM₁₀ no presenta una relación significativa ni consistente con el rendimiento académico de los estudiantes.

Estos resultados difieren parcialmente de algunos estudios nacionales e internacionales que han reportado asociaciones entre la exposición a metales pesados y el desarrollo cognitivo. En el contexto nacional, Ordoñez et al. (2023), identificaron mediante un estudio ecológico, una asociación entre los niveles de Mn en PM₁₀ y un mayor porcentaje de los estudiantes de segundo de primaria de bajo desempeño escolar en el departamento de Junín.³² Sin embargo, dicho estudio se centró en un análisis específico a nivel departamental lo que representa un enfoque distinto al presente estudio, que evaluó el porcentaje de logro satisfactorio a nivel nacional y regional. De manera similar, un estudio observacional transversal realizado en Corea del Sur con 1089 niños de 8 a 11 años, reportó asociaciones entre la exposición a Mn se asociaba con menores puntuaciones en

habilidades de pensamiento, lectura y cálculo, evaluados mediante la Escala de Evaluación de Discapacidades de Aprendizaje (LDES).⁴⁰ Estos resultados, derivados de un diseño a nivel individual y con una medición directa de la exposición biológica, difieren del enfoque ecológico del presente estudio, lo que podría influir en la capacidad para identificar asociaciones y explicar, en parte, las discrepancias observadas.

Desde una perspectiva epidemiológica, los resultados no evidencian una asociación estadísticamente significativa entre la concentración de manganeso en PM₁₀ y el rendimiento académico tanto en segundo de primaria y secundaria. Sin embargo, la dirección de los coeficientes sugiere una tendencia inversa, lo cual podría ser relevante en contextos con mayores niveles de exposición. En contraste, la variable Asistencia con atraso escolar mostró una asociación negativa consistente y significativa, lo que resalta la mayor asociación de factores socioeducativos sobre el rendimiento académico en comparación con los factores ambientales evaluados.

En términos de magnitud, el coeficiente asociado al atraso escolar en primaria ($B = -2.04$) indica que incrementos en este indicador se relacionan con disminuciones relevantes en el rendimiento académico, lo cual tiene implicancias prácticas para políticas educativas. Por otro lado, aunque los coeficientes del manganeso son de mayor magnitud numérica, su amplia variabilidad e imprecisión (intervalos de confianza amplios) limitan su interpretación en términos de relevancia práctica.

Por ello, en una visión integral, los resultados del estudio sugieren que el rendimiento académico en el Perú responde a un modelo multifactorial, en el cual los determinantes educativos y sociales presentan un mayor peso explicativo que la exposición ambiental evaluada. En este contexto, la exposición a manganeso en aire en PM₁₀, no mostró una asociación significativa con el desempeño académico en los niveles observados.

No obstante, ello no excluye la posible existencia de asociación a nivel individual o en escenarios de mayor exposición, por lo que se recomienda continuar fortaleciendo la vigilancia ambiental y promover estudios con diseños analíticos más robustos que permitan evaluar con mayor precisión la relación entre contaminantes atmosféricos y desarrollo cognitivo. De esta manera, se contribuirá a una comprensión más integral de los factores que influyen en el aprendizaje y al diseño de políticas públicas orientadas tanto a la mejora de la calidad educativa como a la protección de la salud ambiental.

X. Fortaleza y Limitaciones

Las fortalezas de la investigación son:

1. Representa la primera investigación que analiza la correlación entre la exposición a metales tóxicos presente en el aire, en particular, el manganeso en PM_{10} y el rendimiento académico en alumnos del segundo nivel primario y secundario en el Perú.
2. Utiliza fuentes oficiales (DIGESA, MINEDU, INEI), lo que garantiza la validez y confiabilidad de los datos analizados.
3. Se verificaron los supuestos estadísticos del modelo, lo que fortalece la validez interna de los resultados.
4. Permite generar evidencia base para futuras investigaciones en salud ambiental y educación en el país.

A su vez, en cuanto a los factores limitantes que se presentan vienen a ser los que siguen:

1. El diseño ecológico empleado implica limitaciones inherentes, como la falacia ecológica, que ocurre cuando las asociaciones observadas a nivel agregado no necesariamente reflejan relaciones a nivel individual. Asimismo, el uso de datos agrupados puede introducir sesgo de agregación, diluyendo posibles asociaciones individuales entre la exposición al manganeso y el rendimiento académico. En consecuencia, los resultados deben interpretarse a nivel poblacional y no como evidencia de relaciones causales a nivel individual.
2. La población del estudio estuvo determinado por la disponibilidad de información secundaria proveniente de fuentes oficiales (DIGESA y MINEDU). La unidad de análisis correspondió a la combinación departamento-año, considerando únicamente aquellos casos con registros coincidentes de concentración de manganeso en PM_{10} y rendimiento académico durante el periodo 2007–2019. Esta restricción implicó la inclusión de 17 observaciones válidas, lo cual es consistente con estudios ecológicos que emplean datos agregados a nivel poblacional. Si bien el tamaño muestral es limitado, este refleja las condiciones reales de disponibilidad de información ambiental en el contexto peruano.

3. El tamaño muestral reducido es una limitación del estudio, lo cual puede afectar la potencia estadística para detectar asociaciones significativas (riesgo de error tipo II). Asimismo, la presencia de colinealidad entre variables socioeducativas, evidenciada por valores elevados de VIF en el modelo inicial, refleja la interdependencia estructural de estos indicadores. Aunque se aplicaron estrategias de depuración del modelo, estas condiciones podrían influir en la estabilidad de las estimaciones y en la precisión de los intervalos de confianza.
4. La ausencia de datos en algunas regiones, como la Selva, impidió un análisis completo del territorio peruano.
5. Otros indicadores de salud o sociodemográficos que podrían influir en la asociación analizada tales como la dieta, el uso de medicamentos, el género, la etnia, la carga genética, condiciones médicas preexistentes o el nivel educativo materno, no fueron considerados debido que no existen bases de datos con estos indicadores para los grupos etarios seleccionados.
6. Se evidenció colinealidad entre variables educativas, lo que limitó la construcción de modelos más completos.

XI. Conclusiones

1. No se encontró evidencia de una asociación estadísticamente significativa entre las concentraciones de manganeso en PM_{10} y el rendimiento académico en estudiantes de segundo de primaria y secundaria en el Perú durante el periodo 2007–2019.
2. Las correlaciones observadas en los análisis bivariados fueron débiles y no significativas, —a nivel nacional en educación secundaria en matemáticas ($\rho = -0,074$; $p = 0,7802$), y a nivel regional en la Costa en educación secundaria en lectura ($\rho = -0,006$; $p = 0,919$) y matemáticas ($\rho = -0,429$; $p = 0,419$), así como en la Sierra en educación secundaria en lectura ($\rho = -0,382$; $p = 0,279$)—, lo que indica que la exposición a manganeso en los niveles registrados no explica de manera directa las diferencias en el logro académico.

3. En los modelos de regresión ajustados, la concentración de manganeso no se comportó como un predictor significativo del rendimiento académico, lo que sugiere la presencia de factores de confusión, principalmente de tipo educativo y social.
4. La variable “asistencia con atraso escolar” mostró una asociación negativa significativa con el rendimiento académico de estudiantes de primaria en las pruebas de Lectura y Matemáticas, evidenciando que las condiciones estructurales del sistema educativo tienen un impacto más relevante sobre el desempeño escolar.
5. Los hallazgos respaldan que el rendimiento académico es un fenómeno multifactorial, donde los determinantes educativos y sociales predominan sobre los factores ambientales en el contexto analizado.
6. Finalmente, este estudio contribuye a la evidencia científica en salud ambiental y educación en el país, y subraya la importancia de incorporar un enfoque multidisciplinario para entender los determinantes del aprendizaje, promoviendo políticas públicas que consideren tanto factores pedagógicos como ambientales.

XII. Recomendaciones

1. Fortalecer los sistemas de vigilancia de la calidad del aire en el Perú, ampliando la cobertura geográfica y la continuidad de los monitoreos de metales pesados como el manganeso en material particulado PM₁₀, especialmente en regiones con actividades mineras e industriales.
2. Promover estudios con diseños analíticos a nivel individual (cohortes o estudios longitudinales), que permitan evaluar con mayor precisión la relación entre la exposición a manganeso y el desarrollo cognitivo o rendimiento académico, superando las limitaciones del diseño ecológico.

3. Priorizar intervenciones en el ámbito educativo orientadas a reducir el atraso escolar, dado que esta variable mostró una asociación significativa con el rendimiento académico, evidenciando su relevancia como determinante del desempeño estudiantil.
4. Diseñar políticas públicas intersectoriales que integren salud ambiental y educación, considerando que el rendimiento académico es un fenómeno multifactorial asociado principalmente por factores sociales y educativos.
5. Fomentar la articulación entre entidades como el sector salud, educación y ambiente para el desarrollo de estrategias integrales que permitan mejorar tanto las condiciones ambientales como los resultados educativos en el país.

XIII. Referencias

1. Gonzales Rengifo GF, Raraz Vidal OB, Vasquez Apestegui BV. Investigación en salud ambiental: la contribución peruana al regional GEOHealth Hub centered en Perú. Lima: Universidad Peruana Cayetano Heredia; 2020.
2. Tsuda A, Henry FS, Butler JP. Particle transport and deposition: basic physics of particle kinetics. *Compr Physiol.* 2013;3(4):1437–1471. doi:10.1002/cphy.c100085
3. Lelieveld J, Pozzer A, Pöschl U, Fnais M, Haines A, Münzel T. Air pollution deaths attributable to fossil fuels: observational and modelling study. *BMJ.* 2023;383:e077784. doi:10.1136/bmj-2023-077784.
4. IQAir. 2024 World Air Quality Report [Internet]. Steinach: IQAir; 2025 [citado 2026 Abr 13]. Disponible en: <https://www.iqair.com/us/newsroom/waqr-2024-pr>
5. Ordoñez-Aquino C, Gonzales GF. Calidad del aire en Perú no se ajusta a los valores recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS). *Rev Med Hered.* 2023;34(4):236–238. doi:10.20453/rmh.v34i4.5155.
6. United States Environmental Protection Agency (EPA). Conceptos básicos sobre el material particulado (PM, por sus siglas en inglés) [Internet]. Washington (DC): EPA; [citado 2026 Abr 13]. Disponible en:

<https://espanol.epa.gov/espanol/conceptos-basicos-sobre-el-material-particulado-pm-por-sus-siglas-en-ingles>

7. IQAir. 2020 World Air Quality Report [Internet]. Goldach (Suiza): IQAir; 2021 [citado 2026 Abr 13]. Disponible en: <https://www.iqair.com/dl/pdf-reports/world-air-quality-report-2020-en.pdf>
8. Gonzales GF, Zevallos A, Gonzales-Castañeda C, Nuñez D, Gastañaga C, Cabezas C, et al. Contaminación ambiental, variabilidad climática y cambio climático: una revisión del impacto en la salud de la población peruana. *Rev Peru Med Exp Salud Publica*. 2014;31(3):547–556. Disponible en: http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1726-46342014000300021
9. Sanchez-Ccoyllo OR, Gala-Barraza Y, Arratea-Morán J. Analyzing PM10 concentrations and their trace elements in southern Lima, Peru: a case study from March 06th to 13th, 2020. *DYNA*. 2022;89(221):18–23. doi:10.15446/dyna.v89n221.97133.
10. Phairuang W, Suwattiga P, Chetianukornkul T, Hongtieab S, Limpaseni W, Ikemori F, et al. Chemical composition, sources, and health risk assessment of PM2.5 and PM10 in urban sites of Bangkok, Thailand. *Int J Environ Res Public Health*. 2022;19(21):14281. doi:10.3390/ijerph192114281.
11. Moulton PV, Yang W. Air pollution, oxidative stress, and Alzheimer’s disease. *J Environ Public Health*. 2012;2012:472751. doi:10.1155/2012/472751.
12. Balachandran R, Mukhopadhyay S, McBride D, Veevers J, Harrison F, Aschner M, et al. Brain manganese and the balance between essential roles and neurotoxicity. *J Biol Chem*. 2020;295(19):6312-6329.
13. Williams M, Todd GD, Roney N, Crawford J, Coles C, McClure PR, et al. Toxicological profile for manganese [Internet]. Atlanta (GA): Agency for Toxic Substances and Disease Registry (US); 2012 Sep [citado 2026 Abr 13]. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK158872/>
14. Perl DP, Olanow CW. The neuropathology of manganese-induced Parkinsonism. *J Neuropathol Exp Neurol*. 2007;66(8):675-82
15. Aschner M, Erikson KM, Dorman DC. Manganese transport into the brain: mechanisms and neurotoxicity. *Neurotoxicology*. 2005;26(4):527-37.

16. Dorman DC, Brenneman KA, McElveen AM, Lynch SE, Roberts KC, Wong BA. Olfactory transport: a direct route of delivery of inhaled manganese to the brain. *Neurotoxicology*. 2002;23(4-5):635-44.
17. Roels H, Lauwerys R, Buchet JP, Genet P, Sarhan MJ, Hanotiau I, et al. Epidemiological survey among workers exposed to manganese: effects on lung, central nervous system, and some biological indices. *Am J Ind Med*. 1987;11(3):307-27
18. Solís-Vivanco R, Rodríguez-Agudelo Y, Riojas-Rodríguez H, Ríos C, Rosas I, Montes S. Cognitive impairment in an adult Mexican population non-occupationally exposed to manganese. *Environ Toxicol Pharmacol*. 2009;28(2):172-8.
19. Rodier J. Manganese poisoning in Moroccan miners. *Br J Ind Med*. 1955;12(1):21-35. doi:10.1136/oem.12.1.21.
20. Ordoñez C. Asociación entre la muerte fetal y la exposición a PM2.5 en gestantes de Lima Metropolitana del 2010 al 2016 [tesis de maestría]. Lima: Universidad Peruana Cayetano Heredia; 2023. Disponible en: https://repositorio.upch.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12866/9467/Asociacion_OrdenezAquino_Carol.pdf
21. Dirección General de Salud Ambiental (DIGESA). Monitoreo de metales pesados en el aire [Internet]. Lima: Ministerio de Salud del Perú; [citado 2023 Nov 18]. Disponible en: http://www.digesa.minsa.gob.pe/DCOVI/mapas/DIGESA_AIR_BD_Metales_MapaCover.html
22. Perú DM. Calidad del aire: uso de equipo muestreador de alto volumen Hi-Vol [Internet]. YouTube; [citado 2026 Mar 19]. Disponible en: <https://www.youtube.com/watch?v=Rd2p3UloxzE>
23. Sistema Nacional de Información Ambiental (SINIA). Decreto Supremo N.º 020-2021-MINAM [Internet]. Lima: Ministerio del Ambiente del Perú; [citado 2023 Sep 19]. Disponible en: <https://www.gob.pe/institucion/minam/normas-legales/>
24. Perú. Ministerio del Ambiente. Decreto Supremo N.º 011-2023-MINAM, Decreto Supremo que aprueba los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Aire. Lima: El Peruano; 2023. Disponible en: <https://busquedas.elperuano.pe/>

25. Perú. Ministerio del Ambiente. Protocolo nacional de monitoreo de la calidad ambiental del aire [Internet]. Lima: Ministerio del Ambiente del Perú; [citado 2025 Oct 19]. Disponible en: https://sinia.minam.gob.pe/sites/default/files/sinia/archivos/public/docs/protocolo_monitoreo_aire.pdf
26. Perú. Ministerio de Educación. Evaluación muestral de estudiantes 2022 [Internet]. Lima: Ministerio de Educación del Perú; [citado 2023 Sep 19]. Disponible en: <http://umc.minedu.gob.pe/resultadossem2022/>
27. Perú. Ministerio de Educación. Oficina de Medición de la Calidad de los Aprendizajes. Introducción a los niveles de logro de las evaluaciones de logros de aprendizaje [Internet]. Lima: Ministerio de Educación del Perú; [citado 2026 Mar 19]. Disponible en: <http://umc.minedu.gob.pe/introduccion-a-los-niveles-de-logro-de-las-evaluaciones-de-logros-de-aprendizaje/>
28. Perú. Ministerio de Educación. Oficina de Medición de la Calidad de los Aprendizajes. ¿Qué aprendizajes logran nuestros estudiantes? Resultados de las evaluaciones nacionales de logros de aprendizaje 2019. Lima: Ministerio de Educación; 2020. Disponible en: <http://umc.minedu.gob.pe/wp-content/uploads/2020/06/Reporte-Nacional-2019.pdf>
29. Perú. Instituto Nacional de Estadística e Informática. Perú: indicadores de educación por departamentos 2009–2019 [Internet]. Lima: INEI; [citado 2024 Oct 18]. Disponible en: https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1751/libro.pdf
30. Perú. Instituto Nacional de Estadística e Informática. Perú: indicadores de educación por departamentos 2007–2017 [Internet]. Lima: INEI; [citado 2024 Oct 18]. Disponible en: https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1529/libro.p
31. Nyarko-Danquah I, Pajarillo E, Digman A, Soliman K, et al. Manganese Accumulation in the Brain via Various Transporters and Its Neurotoxicity Mechanisms. *Molecules* [Internet]. 2020 Dec [citado 2023 Sep 19]; 12;25(24):5880. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.3390/molecules25245880>

32. Ordoñez-Aquino C, Gonzales-Arimborgo C, Gonzales GF. Manganese, otro contaminante en el aire que afecta el rendimiento escolar en el Perú. *Rev Soc Peru Med Interna.* 2023;36(2):e748. Disponible en: <https://revistamedicinainterna.net/index.php/spmi/article/view/748>
33. Riojas-Rodríguez H, Solís-Vivanco R, Schilman A, Montes S, et al. Intellectual function in Mexican children living in a mining area and environmentally exposed to manganese. *Environ Health Perspect.* 2010;118(10):1465-70. doi:10.1289/ehp.0901229.
34. Gunier RB, Arora M, Jerrett M, Bradman A, Harley KG, Mora AM, Kogut K, Hubbard A, Austin C, Holland N, Eskenazi B. Manganese in teeth and neurodevelopment in young Mexican-American children. *Environ Res.* 2015;142:688-95. doi:10.1016/j.envres.2015.09.003. PMID:26381693; PMCID: PMC4696558.
35. Gartland N, Aljofi H, Dienes K, Munford L, Theakston AL, Van Tongeren M. The effects of traffic air pollution in and around schools on executive function and academic performance in children: a rapid review. *Int J Environ Res Public Health.* 2022;19(2):749. doi:10.3390/ijerph19020749.
36. Menezes-Filho JA, Novaes CO, Moreira JC, Sarcinelli PN, Mergler D. Elevated manganese and cognitive performance in school-aged children and their mothers. *Environ Res.* 2011;111(1):156-63. doi:10.1016/j.envres.2010.09.006.
37. Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI). Perú: formas de acceso al agua y saneamiento básico [Internet]. Lima: INEI; 2020 [citado 2024 Oct 18]. Disponible en: https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/boletines/boletin_agua_junio2020.pdf
38. World Health Organization. Air quality guidelines for Europe. 2nd ed. Copenhagen: WHO Regional Office for Europe; 2000.
39. World Health Organization. Air pollution and health [Internet]. Geneva: World Health Organization; 2021 [citado 2026 Apr 13]. Disponible en: <https://www.who.int/health-topics/air-pollution>
40. Bhang S-Y, Cho S-C, Kim J-W, Hong Y-C, Shin M-S, Yoo HJ, et al. Relationship between blood manganese levels and children's attention, cognition, behavior, and academic performance--a nationwide cross-sectional study. *Environ Res*

[Internet].

2013;126:9–16.

Disponible

en:

<http://dx.doi.org/10.1016/j.envres.2013.05.006>