



Universidad del
Rosario

**Alteraciones citogenéticas y niveles de mercurio y níquel en las poblaciones
de los municipios de Nechí y Montelíbano de Colombia**

Investigador principal

Jenny Lessette Páez Pira

Ella Maria Mazuera Polanco

**Trabajo presentado como requisito para optar por el título de Maestría en
Salud y Seguridad en el Trabajo
Universidad del Rosario
Bogotá, 2025**

**Alteraciones citogenéticas y niveles de mercurio y níquel en las poblaciones
de los municipios de Nechí y Montelíbano de Colombia**

Estudiante(s):

Jenny Lessette Páez Pira
Ella Maria Mazuera Polanco

Asesor temático

Dra. Marcela Eugenia Varona Uribe

Asesor metodológico:

Dra. Angela Espinosa

Nombre del programa
Universidad del Rosario

Bogotá D.C., 2025

Alteraciones citogenéticas y niveles de mercurio y níquel en las poblaciones de los municipios de Nechí y Montelíbano de Colombia

Jenny Lessette Páez Pira, Ella María Mazuera Polanco, Marcela Eugenia Varona Uribe, Angela Espinosa

RESUMEN:

Introducción: El mercurio y níquel son sustancias químicas ampliamente usados en la actividad minera, cuya exposición prolongada en la población ocupacional y ambientalmente expuesta puede tener riesgo de desarrollar patologías y alteraciones citogenéticas que afectan directamente la salud, reducen la calidad de vida y disminuyen la productividad laboral, tanto a nivel individual como colectivo.

Objetivo: Determinar las alteraciones citogenéticas y los niveles de mercurio y níquel en la población de los municipios de Nechí (Antioquia) y Montelíbano (Córdoba), Colombia

Materiales y métodos: Se realizó un estudio de tipo descriptivo transversal en personas con exposición ocupacional o ambiental en los municipios de Nechí Antioquia y Montelíbano Córdoba, en el cual se hicieron mediciones tanto de niveles de mercurio y níquel como de la prueba de test de micronúcleos en muestras biológicas y mediante una encuesta se realizó una caracterización de las variables de interés. Se calcularon medidas de tendencia central y de dispersión y se evaluaron diferencias estadísticamente significativas.

Resultados: Se evaluaron 203 personas en los municipios de Nechí y Montelíbano, Colombia con un promedio de edad $50,67 \pm 13,41$ años con rangos de edades entre los 21 y 83 años de los cuales 51,23% están en el municipio de Nechí y 48,77% en Montelíbano. El sexo masculino represento un 83,6% (83) en Montelíbano y 76 % (75) en Nechí. Se encontró una mediana para níquel de 0,327 $\mu\text{g/g}$ con un mínimo 0,049 $\mu\text{g/g}$ y un máximo de 17,776 $\mu\text{g/g}$ y para Mercurio una mediana de 2,129 $\mu\text{g/g}$ con un mínimo 0,058 $\mu\text{g/g}$ y un máximo de 17,144 $\mu\text{g/g}$ en muestras de cabello. En la prueba de citoma de micronúcleos se encontró para el municipio de Montelíbano una mediana de 4, con un mínimo de 0 y un máximo de 13 y para el municipio de Nechí una mediana de 5, con un mínimo de 0 y un máximo de 17. El consumo de pescado tiene una marcada relación con los niveles por encima del valor de referencia de los metales para níquel (95,4%) y para mercurio (94,7%).

Conclusión: Los resultados encontrados confirman la presencia de niveles elevados de mercurio y níquel en las poblaciones evaluadas, así como evidencia de alteraciones citogenéticas que demuestra la exposición crónica a estos metales.

Palabras claves:

Mercurio, Níquel, alteraciones citogenéticas, daño del ADN, efectos genotóxicos.

INTRODUCCION

En Colombia, la minería ha sido una actividad que por años ha impulsado el desarrollo económico y social de muchas regiones, generando empleo y crecimiento local. Pero, detrás de este progreso también se esconde una realidad preocupante: el impacto ambiental y las consecuencias en la salud de las comunidades que viven cerca de las zonas

mineras. En muchos casos, estas prácticas se desarrollan sin un control técnico ni ambiental adecuado, aumentando los riesgos tanto para los ecosistemas como para las personas (PNUMA, 2019). Los municipios de Nechí, en Antioquia, y Montelíbano, en Córdoba, son un claro ejemplo de esta situación, ya que sus poblaciones conviven diariamente con las consecuencias de la extracción de oro y níquel, respectivamente. El contacto constante con metales pesados, junto con la falta de medidas de protección efectivas, ha aumentado la vulnerabilidad frente a los efectos tóxicos y genotóxicos de estas sustancias (Marrugo & Calao, 2013).

El mercurio, ampliamente usado en la minería artesanal para separar el oro, es un metal extremadamente tóxico incluso en concentraciones bajas. Puede ingresar al cuerpo por inhalación, ingestión o contacto con la piel, acumulándose en tejidos y afectando el sistema nervioso central (OMS, 2017). Su forma orgánica, el metilmercurio, tiene la capacidad de pasar de un organismo a otro a través de la cadena alimentaria, acumulándose especialmente en peces y mariscos, lo que representa un riesgo tanto para los mineros como para las comunidades que consumen estos alimentos contaminados (WHO, 2023). Se ha comprobado que la exposición continua al mercurio genera alteraciones neurológicas, renales y reproductivas, además de provocar daños a nivel genético que pueden relacionarse con enfermedades neurodegenerativas (Arrifano et al., 2020). En el caso del níquel, este metal es usado en procesos industriales y metalúrgicos, como la fabricación de acero inoxidable y baterías.

En Montelíbano, donde se encuentra una de las minas de níquel más grandes del continente, la exposición a este metal se ha convertido en una preocupación constante. La inhalación o el contacto prolongado con el níquel puede causar enfermedades respiratorias, alergias cutáneas e incluso cáncer de pulmón o de las vías nasales (IARC, 2021). Su toxicidad radica en la capacidad de generar estrés oxidativo y daño al ADN, afectando la estabilidad cromosómica y promoviendo mutaciones celulares (Filipovic et al., 2021). Estudios recientes también han evidenciado que el níquel puede alterar los mecanismos epigenéticos al sustituir al hierro en la estructura del ADN, ocasionando desmetilación de histonas y pérdida del control genómico (Kim et al., 2020).

Investigaciones en Colombia y otros países han demostrado que la exposición prolongada a metales pesados puede producir daños genéticos que se identifican mediante la prueba

de micronúcleos, una herramienta útil para observar fragmentos de cromosomas que no se integran correctamente durante la división celular. Un aumento en la frecuencia de estos micronúcleos está asociado con mayor riesgo de cáncer y pérdida de estabilidad genómica en poblaciones expuestas a contaminantes (Marrugo & Calao, 2013). Estas pruebas, realizadas a linfocitos de sangre periférica, son hoy en día uno de los métodos más confiables para la vigilancia ambiental y la salud de comunidades que viven en zonas de riesgo (Filipovic et al., 2021).

La problemática ambiental y sanitaria causada por la minería no solo afecta a los trabajadores que realizan las labores extractivas, sino también a las comunidades cercanas que dependen del agua, el aire o los alimentos contaminados (UNEP, 2022). En el caso particular de Nechí y Montelíbano, la exposición simultánea a mercurio y níquel plantea un desafío complejo que involucra tanto la salud pública como la seguridad y salud en el trabajo. Comprender los niveles de exposición y los posibles daños genéticos permite establecer vínculos claros entre la contaminación ambiental y las afectaciones biológicas que se observan en las personas (PNUMA, 2019).

Por todo lo anterior, este estudio cobra una gran importancia, ya que busca aportar evidencia científica sobre los posibles efectos genotóxicos que generan el mercurio y el níquel en las comunidades mineras de Nechí y Montelíbano. Identificar las alteraciones citogenéticas y cuantificar los niveles de estos metales no solo permitirá entender mejor los mecanismos de daño celular, sino también fortalecer las políticas públicas en salud ambiental y seguridad laboral. De esta manera, se espera contribuir con herramientas que promuevan la prevención, la educación y el control, protegiendo tanto a los trabajadores como al entorno natural que los rodea generando una minería más sostenible, donde el bienestar humano y ecológico ocupen el centro de las decisiones.

MATERIALES Y METODOS

Se realizó un estudio descriptivo transversal en los municipios de Nechí del departamento de Antioquia y Montelíbano de Córdoba (Colombia), en la población ocupacional y ambientalmente expuesta a mercurio y níquel por las actividades mineras cada zona, para determinar la exposición a mercurio y níquel y las alteraciones citogenéticas en la población.

Se entiende por población ocupacionalmente expuesta la dedicada a la actividad minera o agrícola, quienes por su trabajo manipulan metales, por lo que su exposición es directa (población trabajadora) y la ambientalmente expuesta es la que se expone de forma indirecta a través matrices ambientales como son aire, agua, suelos y alimento (población general).

Se calculó un tamaño de muestra mínimo para estudios descriptivos transversales con el aplicativo Open Epi, utilizando la población de Nechí (Antioquia) y Montelíbano (Córdoba), según los datos ofrecidos por el DANE (2005) el cual era de 20.668 y 69.277 habitantes respectivamente.

La frecuencia del estudio fue del 30,3% correspondiente a la proporción de individuos ambiental y ocupacionalmente expuestos con presencia de alteraciones en el test de micronúcleos y niveles de mercurio y níquel tomados en muestras biológicas que superan los límites permisibles, según estudio llevado a cabo por parte del Ministerio de Salud en los departamentos de Antioquia y Córdoba. Se tomó tanto el mercurio como el níquel como químico de referencia dada la importancia de este como contaminante ambiental en Colombia (Min Salud, 2018, p. 7). El error aceptable definido por el equipo de investigación fue del 5%, con un índice de confianza del 95%.

El acercamiento a esta población se realizó a través de la secretaria de Salud Municipal y se llevó a cabo la selección de la población a la cual se le explicó sobre el estudio, los objetivos y los beneficios de participar en este.

Para el estudio se tuvo en cuenta como variables dependientes los test de micronúcleos, y los indicadores de exposición de mercurio y níquel en muestra de cabello y como variables independientes las laborales (oficio actual, tiempo en el oficio, antecedente de trabajo en actividades mineras, tipo de minería, horas de exposición al día, uso de elementos de protección personal), ambientales (residencia en área de minería, vivienda cerca a sitios), hábitos alimenticios (consumo de pescado, tamaño del pescado, consumo de enlatados), toxicológicas (condición de fumador y consumo de alcohol) y sociales y demográficas (edad, sexo, municipio, área, escolaridad, afiliación al SGSSS, estado civil).

Se incluyeron en el estudio adultos mayores de 18 años, sin distinción de sexo o grupo étnico, así como mujeres embarazadas. La población participante estuvo conformada por individuos expuestos de manera ocupacional y/o ambiental, que hubieran utilizado mercurio o níquel durante al menos seis meses, o que residieran en zonas rurales o urbanas con

presencia de estos metales. De igual forma se excluyeron aquellos individuos que hayan presentado alguna enfermedad preexistente a la exposición, enfermedades oncológicas, neurológicas como epilepsia, Parkinson, evento cerebro vascular o trastornos mentales como esquizofrenia o alteración bipolar y aquellas personas que no firmaran el consentimiento informado.

Se aplicó a todos los individuos seleccionados una encuesta mediante formularios adaptados del instrumento de evaluación en salud del Global Mercury Project (Veiga M, 2004). Adicionalmente se aplicó otro formulario con preguntas para evaluar la presencia de algunos síntomas relacionados con el efecto toxico de mercurio y níquel a cargo del grupo investigador.

Se identificaron los niveles de mercurio y níquel en muestras biológicas de cabello en la población expuesta, para ello a cada participante previa explicación de los procedimientos y firma del consentimiento informado, se le tomó una muestra de cabello de la región occipital del cuero cabelludo, a cargo de médicos/bacteriólogos/enfermeros. Las determinaciones fueron analizadas por ICP-MS en el Laboratorio de ICP-MS (Espectrómetro de Masa con Plasma Acoplado Inductivamente) del Departamento de Química de la Pontificia Universidad Católica de Rio de Janeiro en Brasil.

Se llevó a cabo el test de citoma de micronúcleos (MN) con bloqueo de citocinesis según lo descrito por Fenech (2007) con cultivos tomados a través de muestras biológicas de sangre, la frecuencia de MN en células binucleadas y mononucleada se hallaron evaluando 2000 células por muestra. Las placas portaobjetos fueron analizadas a doble ciego, en microscopio óptico de campo claro (40X de magnificación) y posteriormente para la identificación de células, mononucleadas, binucleadas con macronúcleos y polinucleadas, también se registraron los eventos citostaticos (apoptosis, necrosis, puentes nucleoplasmaticos y brotes nucleares).

Se llevó a cabo un estudio piloto en un 10% del total de la muestra de individuos, aplicando el formulario a través de llamadas telefónicas, en la que tres de los investigadores del estudio, que estaban capacitados para esta actividad, hicieron las preguntas a un total de 10 personas. Estos participantes no formaron parte de la población muestra seleccionada en la investigación.

En el análisis estadístico descriptivo se utilizaron medidas de tendencia central y dispersión para aquellas variables de naturaleza numérica. Las variables medidas en escala nominal

se describieron con base en prevalencias con sus intervalos de confianza al 95% y distribuciones porcentuales con el software SPSS vr. 25 licencia de la Universidad del Rosario, Epi Info versión 7.2.1.0., Epidat 4.2 y Excel 2016., Para la relación de los niveles de mercurio y níquel en muestras biológicas y de test de micronúcleos, la composición sociodemográfica, antecedentes laborales y hábitos de la población, se hizo diferencia de proporciones chi cuadrado, prueba exacta de Fischer, diferencia de medias por la prueba t de student para las variables con distribución normal y la prueba de U de Mann-Whitney y prueba de Kolmogórov-Smirnov para las variables con distribución no normal.

Teniendo en cuenta la Resolución 8430 de 1993 del Ministerio de Salud que establece las normas académicas, técnicas y administrativas para la investigación en salud, se clasifica esta investigación como de riesgo mínimo. (Resolución 8430 de 1993).

El estudio cumplió con los principios y disposiciones de la Declaración de Helsinki (World Medical Association, 2017) y principios bioéticos (Emanuel, 1999). El proyecto fue aprobado por el Comité de Ética y metodologías de Investigación (CEMIN) del Instituto Nacional de Salud (INS) mediante acta CEMIN-23-2018.

RESULTADOS

Se incluyeron en el estudio 203 personas, con un promedio de edad de $50,67 \pm 13,41$ años con rangos de edades entre los 21 y 83 años de los cuales 51,23% (104) están en el municipio de Nechí y 48,77% (99) en Montelíbano, siendo un poco más joven la población de Nechí, con una mediana de 50 años en comparación con la mediana de 55 años de Montelíbano encontrando una diferencia estadísticamente significativa ($p=0,014$). Adicionalmente, el sexo femenino representó un 16,25% (16) en Montelíbano y un 24% (25) en Nechí, en comparación con un 83,6% (83) en Montelíbano y 76 % (75) en Nechí para el sexo masculino, siendo mayor la cantidad de hombres en las muestras de ambos municipios.

De igual forma se evidencia que en ambos hay una distribución similar con respecto a la exposición ocupacional siendo mayor en Montelíbano del 63,6% (63) y en Nechí 59,6% (62) a comparación de la ambiental.

La distribución de la población en la cabecera municipal es mayor en Montelíbano en un 82,8% (82), rural 17,2 % (17) a diferencia de Nechí 44,2% (46) y 55,8% (58) respectivamente con una diferencia estadísticamente significativa ($p= 0,001$). Las características sociodemográficas, ocupacionales y hábitos de la muestra encuestada se relaciona a continuación en la tabla 1.

Tabla 1. Características sociodemográficas, ocupacionales y hábitos de la población de Nechí, Antioquía y Montelíbano, Córdoba.

Variable		Montelíbano	Nechí	Valor de p
		n(%)	n(%)	
Exposición	Ocupacional	63 (63,6)	62 (59,6)	0,55
	Ambiental	36 (36,4)	42 (40,4)	
Área	Cabecera municipal	82 (82,8)	46 (44,2)	0,001
	Rural	17 (17,2)	58 (55,8)	
Sexo	Femenino	16 (16,2)	25 (24)	0,162
	Masculino	83 (83,8)	79 (76)	
Tipo de SGSSS	Contributivo	82 (82,8)	19 (18,3)	0,001
	Subsidiado (Sisben)	16 (16,2)	81 (79,9)	
	No afiliado	1 (1)	3 (2,9)	
	Indeterminado	0 (0)	1 (1)	
Estado Civil	Casado	51 (51,5)	17 (16,3)	0,001
	Unión libre	36 (36,4)	53 (51)	
	Separado	2 (2)	2 (1,9)	
	Viudo	0 (0)	5 (4,8)	
	Soltero	10 (10,1)	27 (26)	
Escolaridad	Analfabeto	2 (2)	13 (12,6)	0,001
	Primaria incompleta	6 (6,1)	21 (20,2)	
	Primaria completa	6 (6,1)	16 (15,4)	
	Secundaria incompleta	6 (6,1)	10 (9,6)	
	Secundaria completa	29 (29,3)	13 (12,5)	
	Tecnico incompleto	2 (2)	3 (2,9)	
	Tecnico Completo	34 (34,3)	19 (18,3)	
	Universitaria Completa	12 (12,1)	9 (8,7)	
Universitaria incompleta	2 (2,0)	0 (0)		
Oficio actual	Administrativas	6 (6,1)	10 (9,6)	0,001
	Agricultura	3 (3)	11 (10,6)	
	Mantenimiento	1 (1)	4 (3,8)	
	Minería y agricultura	57 (57,6)	38 (36,5)	
	Pescador	0 (0)	10 (9,6)	

	Oficios Varios	6 (6,1)	11 (10,6)	
	Otras profesiones	0 (0)	1 (1)	
	Servicios educativos	0 (0)	2 (1,9)	
	Servicios sanitarios	0 (0)	2 (1,9)	
	Ninguno	26 (26,3)	15 (14,4)	
Trabaja en Minería	Si	57 (57,6)	43 (41,3)	0,021
	No	42 (42,4)	61 (58,7)	
Residencia	En zona minera	3 (5,3)	15 (34,1)	0,001
	En zona industria	7 (7,1))	0 (0)	0,006
Fuma actualmente	Si	1 (4,5)	10 (25)	0,044
	No	21 (95,5)	30 (75)	
Fuma en su sitio de trabajo	Si	0 (0)	6 (60)	0,251
	No	1 (100)	4 (40)	
Consume licor actualmente	Si	64 (64,6)	47 (42,3)	0,005
	No	35 (35,4)	57 (54,8)	
Consumo de pescado	Si	96 (97)	94 (90,4)	0,055
	No	3 (3,)	10 (9,6)	
Consumo de enlatados	Si	55 (55,6)	53 (49,1)	0,512
	No	44 (44,4)	51 (49)	

Se incluyeron un total de 203 participantes seleccionadas mediante un muestreo no probabilístico, sin embargo, en el 20,20 % (41) no se contó con la disponibilidad de la muestra de cabello para determinar la concentración de mercurio, por lo cual se presentan los datos de 162 individuos en total, pero la prueba de test de micronúcleos se realizó en toda la población.

Se encontró con respecto a los niveles de níquel y mercurio en muestras de cabello una mediana para níquel de 0,327 $\mu\text{g/g}$ con un mínimo 0,049 $\mu\text{g/g}$ y un máximo de 17,776 $\mu\text{g/g}$ y para Mercurio una mediana de 2,129 $\mu\text{g/g}$ con un mínimo 0,058 $\mu\text{g/g}$ y un máximo de 17,144 $\mu\text{g/g}$ Los valores de estos metales por municipio se evidencian en la tabla 2.

Tabla 2. Valores de Níquel y Mercurio en muestras de cabello en la población de Montelíbano y Nechí, Colombia

Metal pesado		Níquel*		Mercurio**	
		Menor o igual 0,22 ($\mu\text{g/g}$) ppm	> 0,22 ($\mu\text{g/g}$) ppm	Menor o igual a 1 ($\mu\text{g/g}$) ppm	> 1 ($\mu\text{g/g}$) ppm
Montelíbano	Mediana	0,126	0,561	0,655	2,493
	Mínimo	0,049	0,222	0,058	1,014

	Máximo	0,212	17,766	0,963	12,292
Nechí	Mediana	0,135	0,562	0,791	2,997
	Mínimo	0,054	0,229	0,172	1,118
	Máximo	0,217	2,068	0,969	17,144

* Valores de referencia ($\mu\text{g/g}$) ppm: Níquel: 0.22 ± 0.08 . World Health Organization. Environmental Health Criteria 108, Nickel, 1991.

** Valores de referencia ($\mu\text{g/g}$) ppm: Mercurio: 1,00. United Nations Environment Programme, World Health Organization. Guidance for identifying populations at risk from mercury exposure, 2008.

Asimismo, la prueba de citoma de micronúcleos fue realizada en el total de los 203 individuos de la muestra, se encontró para el municipio de Montelíbano una mediana de 4, con un mínimo de 0 y un máximo de 13. Igualmente, para el municipio de Nechí se reportó una mediana de 5, con un mínimo de 0 y un máximo de 17. La distribución del número de micronúcleos teniendo en cuenta los valores de referencia para níquel y mercurio se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Distribución del número de micronúcleos según valores de referencia para Níquel y Mercurio en la población de Montelíbano y Nechí, Colombia

Test de micronúcleos		Níquel		Mercurio	
		Menor o igual a 0,22 ($\mu\text{g/g}$) ppm	> 0,22 ($\mu\text{g/g}$) ppm	Menor o igual a 1 ($\mu\text{g/g}$) ppm	> 1 ($\mu\text{g/g}$) ppm
Montelíbano	Mediana	4	4	3	5
	Mínimo	0	0	0	0
	Máximo	12	13	10	13
Nechí	Mediana	5	5	5	5
	Mínimo	0	0	0	0
	Máximo	17	13	13	17

Adicionalmente, es de destacar el uso de elementos de protección personal (EPP) en la muestra examinada, evidenciando que en Montelíbano se hace uso de ropa de trabajo en un 53,53% (53) con respecto a Nechí en un 5,76% (6); por el contrario, en Nechí se encontró el uso de ropa de diario 51,92% (54) y en Montelíbano 10,10% (10) y en ambos municipios un 83,72% (108) en general lava la ropa que usa en el trabajo en la casa discriminados en un 58,33% (63) Montelíbano y 41,66% (45) Nechí. De todos los encuestados solo el 9,09% (9) contestaron que si usan peto/delantal en Montelíbano y 1,92% (2) en Nechí, por el contrario, es mayor el uso de guantes en un 49,49% (49) en Montelíbano que en Nechí con un 14,42% (15) , principalmente de material de cuero 51,02% (25) para Montelíbano y 40%

(6) para Nechí. En la tabla 4, se encuentran otros de los EPP empleados por los trabajadores incluidos en el estudio.

Tabla 4. Elementos de protección personal en los municipios de Nechí y Montelíbano.

Variable	Montelíbano		Nechí	
	n	%	n	%
Peto/Delantal	9	9,09090909	2	1,92307692
Guantes	49	49,4949495	15	14,4230769
Respirador	43	43,4343434	6	5,76923077
Tapabocas	19	19,1919192	11	10,5769231
Sombrero/Gorra	7	7,07070707	38	36,5384615
Visor	11	11,1111111	7	6,73076923
Monogafas	43	43,4343434	5	4,80769231
Botas de caucho	4	4,04040404	30	28,8461538
Botas en cuero	51	51,5151515	12	11,5384615
Tenis	1	1,01010101	7	6,73076923
Casco	10	10,1010101	2	1,92307692

Al correlacionar las variables como el sexo con los valores de referencia de los metales, se encontró que es el sexo masculino quien presenta mayores casos que superar dicho umbral, en caso de níquel 67% (73) y para mercurio 79,2% (106). El hábito que más impacta en relación a los niveles de referencia es el consumo de licor para níquel 54,1% (59) y 54,9% (73) pero no marcan una drástica diferencia, por el contrario, el consumo de pescado tiene una marcada relación en ambos casos con los niveles por encima del valor de referencia de los metales para níquel 95,4% (104) y para mercurio 94,7% (126). Situación que no muestra diferencia con respecto al consumo de enlatados, como se evidencia en la tabla 5.

Tabla 5. Relación de variables sociodemográficas, laborales y hábitos con valores de referencia de Montelíbano y Nechí, Colombia.

Variable		Níquel		Mercurio	
		Menor o igual a 0,22 (µg/g) ppm	> 0,22 (µg/g) ppm	Menor o igual a 1 (µg/g) ppm	> 1 (µg/g) ppm
		n(%)	n(%)	n(%)	n(%)
Sexo	Femenino	3 (5,7)	36 (33)	12 (41,4)	27 (20,3)
	Masculino	50 (94,3)	73 (67)	17 (58,6)	106 (79,2)
Trabaja en minería	SI	28 (52,8)	51 (46,8)	22 (75,9)	61 (45,9)
	NO	25 (47,2)	58 (53,2)	7 (24,1)	72 (54,1)
	SI	5 (23,8)	6 (21,4)	1 (14,3)	10 (23,8)

Fuma actualmente	NO	16 (76,2)	22 (78,6)	6 (85,7)	32 (76,2)
Consume licor actualmente	SI	25 (47,2)	59 (54,1)	11 (37,9)	73 (54,9)
	NO	28 (52,8)	50 (45,9)	18 (62,1)	60 (45,1)
Consumo de pescado	SI	49 (92,5)	104 (95,4)	27 (93,1)	126 (94,7)
	NO	4 (7,5)	5 (4,6)	2 (6,9)	7 (5,3)
Consumo de enlatados	SI	28 (52,8)	57 (52,3)	16 (55,2)	69 (51,9)
	NO	25 (47,2)	52 (47,7)	13 (44,8)	64 (48,1)

El consumo de enlatados está distribuido de forma similar en ambas poblaciones con respecto a los niveles de metales, encontrando que para Níquel con un valor de referencia menor o igual a 0,22 ($\mu\text{g/g}$) ppm, la mediana se encuentra en 0,471 con un mínimo 0,112 y un máximo de 17,766 de individuos de Montelíbano que consumen y una mediana 0,254 con un mínimo 0,054 y un máximo 1,555 para Nechí; por otra parte superando el valor de referencia de níquel de 0,22 ($\mu\text{g/g}$) ppm, para Montelíbano se tiene una mediana de 0,453 con mínimo 0,049 y un máximo 5,224 y para Nechí una mediana de 0,235 con mínimo 0,057 y un máximo de 2,068 de personas que consumen enlatados.

Con respecto a los hallazgos en consumo de enlatados y niveles de mercurio en los valores de referencia $<$ o igual a 1 ($\mu\text{g/g}$) ppm, se reportó una mediana de 1,772 con mínimo 0,058 y un máximo 12,292 para Montelíbano y una mediana de 2,627 mínimo 0,172 y máximo 17,144 para Nechí. Igualmente superando el nivel de referencia $>$ 1 ($\mu\text{g/g}$) ppm se encontró en Montelíbano una mediana 2,148 con un mínimo 0,092, un máximo 8,715 y para Nechí una mediana 1,974 con un mínimo 0,431 y un máximo 11,733 de individuos que los consumen.

Por último, del total de los encuestados, un 93,59% (190) responden que efectivamente consumen pescado, encontrando una discriminación por municipio y niveles de mercurio y níquel como se relaciona a continuación en la tabla 6.

Tabla 6. Relación entre los niveles de Mercurio y Níquel con el consumo de pescado en los municipios de Montelíbano y Nechí.

Metal	Consumo de pescado	Montelíbano		Nechí	
		SI	NO	SI	NO
Níquel ($\mu\text{g/g}$) ppm	Mediana	0,488	0,256	0,246	0,235
	Mínimo	0,049	0,089	0,057	0,54
	Máximo	17,766	0,423	2,068	1,07

Mercurio (µg/g) ppm	Mediana	2	1,032	2,496	1,494
	Mínimo	0,058	0,575	0,229	0,172
	Máximo	12,292	1,49	17,144	4,031

DISCUSIÓN

Esta investigación permitió determinar las alteraciones citogenéticas y los niveles de mercurio y níquel en la población de los municipios de Nechí (Antioquia) y Montelíbano (Córdoba), Colombia. Respecto a la caracterización de las condiciones sociodemográficas, laborales y ambientales de las poblaciones de Nechí y Montelíbano expuestas a metales de mercurio y níquel, es importante destacar que Montelíbano es un municipio del sur del departamento de Córdoba, el cual posee una de las minas de ferroníquel a cielo abierto más grandes del mundo y la mina más grande de América del sur. Este activo minero- industrial es operado de forma legal, con procesos industrializados que le permiten la realización de una planificación adecuada y la implementación de un plan de manejo ambiental.

Por otra parte, Nechí es un municipio ubicado en la subregión del bajo cauca del departamento de Antioquia y de la región de la Mojana donde opera la minería ilegal de oro, para la cual se hace uso de mercurio en los procesos de amalgamación, lo cual resulta indudablemente en una extracción que no cumple con los estándares ambientales y económicos establecidos, generando un gran impacto ambiental y consecuencias a la salud de las personas expuestas. Al analizar los hallazgos obtenidos en este estudio, se encuentra que la situación de Nechí y Montelíbano refleja realidades sociales, laborales y ambientales profundamente distintas, que a su vez determinan desigualdades en la exposición a riesgos relacionados con la presencia de metales pesados. Aunque ambas poblaciones comparten un contexto económico marcado por actividades mineras y agrícolas, sus condiciones de vida muestran contrastes importantes que ayudan a comprender los resultados.

Teniendo en cuenta lo referido y de acuerdo con los resultados hallados, se encontró que en la población de Nechí predomina la vinculación subsidiada (Sisben) en un 79,9% (81) mientras que, en Montelíbano, el régimen principal es contributivo con el 82,8% (82), se considera que esto es debido al marco de legalidad o títulos mineros que posee cada región, siendo Nechí la relacionada con la informalidad lo cual explica estos resultados. Por otra parte, se observa que las parejas casadas y en unión libre 51,5 y 36,4% (51 y 36)

predominan en el municipio de Montelíbano probablemente por la condición de estabilidad que encuentran estas familias, mientras que en Nechí se encuentra una mayor frecuencia de parejas en unión libre y las solteras 51 (53) y 26 % (27), donde la mayor parte de la población pertenece a zonas rurales o periurbanas, con bajos niveles de escolaridad y con dependencia económica de la minería ilegal.

Por otra parte, la composición demográfica evidenció que Nechí cuenta con una población ligeramente más joven, pero también con menores niveles educativos y mayor proporción de afiliación al régimen subsidiado. Esta situación sugiere un escenario de vulnerabilidad social más pronunciado, lo que podría influir no solo en su exposición a riesgos ambientales, sino también en su capacidad para reconocerlos y mitigarlos. En contraste, Montelíbano muestra mejores condiciones de acceso al sistema de salud y una mayor proporción de población urbana, lo cual podría favorecer un mayor nivel de protección frente a factores ambientales.

Con respecto a lo referente al área laboral, en cada una de las poblaciones de estudio se encuentra una distribución similar, sin embargo, es más la población minera en el municipio de Montelíbano 57,6% (57), cuyo tiempo de trabajo con metales tiene una mediana de 252 (Min 88, Max 483) meses a comparación de Nechí con 180 meses (Min 3, Max 666), lo cual evidencia que algunos trabajadores en Montelíbano tienen una exposición más prolongada en tiempo ($p=0,002$), pero las horas de trabajo tienen máximos iguales de 12 horas, con una mediana de 9 para Montelíbano y de 6 para Nechí ($p < 0,001$).

Los resultados encontrados confirman la presencia de niveles elevados de mercurio y níquel en las poblaciones evaluadas, así como evidencias de alteraciones citogenéticas que demuestra la exposición crónica. Estos hallazgos coinciden con investigaciones previas realizadas en regiones como La Mojana (Calao y Marrugo, 2015), donde se observó una relación directa entre la exposición a metales pesados y el incremento en la frecuencia de micronúcleos, indicador reconocido de daño genético.

En cuanto a los niveles biológicos, las mujeres presentaron concentraciones promedio de níquel de 0.61 $\mu\text{g/L}$ y mercurio de 1.4 $\mu\text{g/L}$, mientras que los hombres registraron 0.26 $\mu\text{g/L}$ y 2.55 $\mu\text{g/L}$, respectivamente. Estos valores, aunque variables, evidencian exposición significativa y diferencias por género atribuibles al tipo de labor y tiempo de contacto con

los materiales. La presencia de alteraciones citogenéticas confirma que los metales pesados inducen daño genético, en concordancia con estudios previos desarrollados por Calao y Marrugo (2015) y Renu et al. (2021).

Otro aspecto que llama la atención fue el uso de elementos de protección personal. Si bien en Montelíbano se observó un mayor uso de ropa de trabajo y guantes, en Nechí persiste la práctica de utilizar ropa cotidiana durante las actividades laborales, la cual, además, es lavada en el hogar. Esta situación representa un riesgo para la persona trabajadora y para su núcleo familiar, ya que facilita la dispersión de contaminantes dentro del hogar. Esto refleja la necesidad urgente de fortalecer la cultura de prevención y el acceso a equipos de protección adecuados.

En cuanto a los resultados de las muestras de cabello, se evidenció que una proporción importante de la población supera los valores de referencia tanto para níquel como para mercurio. Los niveles de mercurio, especialmente, fueron más altos en Montelíbano, lo cual podría estar relacionado con su mayor exposición ocupacional y con prácticas productivas locales. A pesar de esto, las pruebas de micronúcleos revelaron una mediana ligeramente mayor en Nechí, lo que indica que la exposición ambiental, sumada a factores sociales y laborales, podría estar generando un impacto biológico significativo.

La correlación entre el consumo de pescado y los niveles elevados de ambos metales pesados es particularmente relevante. En ambas poblaciones, más del 90% de quienes superaron los umbrales de referencia reportaron consumir pescado con frecuencia. Este hallazgo sugiere que la vía alimentaria es un factor determinante en la bioacumulación de metales pesados en estas comunidades, especialmente para mercurio, lo cual debe ser considerado en futuras intervenciones de salud pública.

Finalmente, el análisis del test de micronúcleos mostró que, mientras el mercurio sí se asoció a mayores alteraciones citogenéticas cuando superó los valores de referencia, en el caso del níquel esta relación no fue tan evidente ya que el número de micronúcleos reportado fue un poco menor. Esto puede ser debido a que los trabajadores de Montelíbano laboran con mejores condiciones de higiene y seguridad industrial. Estos resultados muestran el impacto genotóxico en estas poblaciones, lo que coincide con la evidencia científica internacional. La presencia de alteraciones citogenéticas confirma que los metales

pesados inducen daño genético, en concordancia con estudios previos desarrollados por Calao y Marrugo (2015) y Renu et al. (2021), especialmente teniendo en cuenta que el níquel es un reconocido agente carcinogénico como lo indica la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC).

En general, los hallazgos reafirman que la interacción entre condiciones sociodemográficas, prácticas laborales, hábitos de consumo y exposición ambiental configura un escenario de riesgo complejo que requiere intervenciones integrales. La seguridad y salud en el trabajo no puede abordarse únicamente desde el ámbito laboral, sino que debe considerar el contexto completo en el que viven y trabajan estas comunidades.

CONCLUSIONES

Los municipios de Nechí y Montelíbano mostraron realidades sociales, laborales y ambientales diferentes, lo que juega un papel importante en la exposición a metales pesados, sin embargo, comparten que su sustento principal proviene de actividades mineras y agrícolas.

Las poblaciones de Nechí y Montelíbano habitan y laboran en la zona desde hace más de 20 años y están expuestas a mezclas de sustancias químicas como son el mercurio y níquel, lo que indican que tienen una exposición crónica que puede desencadenar efectos sobre la salud.

La exposición de estas poblaciones es tanto ocupacional como ambiental, ya que se encontraron niveles por encima de los valores de referencia para tanto para níquel como para mercurio en muestras de cabello.

Se encontró un número alto de micronúcleos en las dos poblaciones objeto del estudio lo que muestra los efectos genotóxicos que se pueden inducir por la exposición a mezclas de sustancias químicas, no solo en la población trabajadora sino en la comunidad general.

RECOMENDACIONES

Esta investigación demuestra la necesidad de impulsar planes a nivel regional, promoviendo la minería responsable y el control de sustancias tóxicas y da herramientas

para la creación de políticas orientadas a la prevención, monitoreo y atención de los efectos de la exposición a metales pesados.

Se hace necesario crear programas de monitoreo biológico y ambiental permanentes en las comunidades mineras y de igual forma fortalecer la educación con énfasis en el manejo seguro de sustancias químicas.

También es importante regular y vigilar el uso de mercurio en la minería artesanal, promoviendo su sustitución por tecnologías limpias, sin dejar de lado el desarrollo de políticas intersectoriales que integren salud, trabajo y ambiente en la vigilancia sanitaria.

BIBLIOGRAFÍA

1. Arrifano, G. de P. F., de Oliveira, M. A., Souza-Monteiro, J. R., Paraense, R. O., Ribeiro-Dos-Santos, A., Vieira, J. R. D. S., Silva, A. L. da C., Macchi, B. de M., do Nascimento, J. L. M., Burbano, R. M. R., & Crespo-Lopez, M. E. (2018). Role for apolipoprotein E in neurodegeneration and mercury intoxication. *Frontiers in Bioscience (Elite Edition)*, *10*(2), 229–241. <https://doi.org/10.2741/e819>. PMID: 28930615
2. Arrifano, G. P. F., Martín-Doimeadios, R. C. R., Jiménez-Moreno, M., Fernández-Trujillo, S., Augusto-Oliveira, M., Souza-Monteiro, J. R., Macchi, B. M., Alvarez-Leite, J. I., do Nascimento, J. L. M., Amador, M. T., Santos, S., Ribeiro-Dos-Santos, Â., Silva-Pereira, L. C., Oriá, R. B., & Crespo-Lopez, M. E. (2018). Genetic susceptibility to neurodegeneration in Amazon: Apolipoprotein E genotyping in vulnerable populations exposed to mercury. *Frontiers in Genetics*, *9*, 285. <https://doi.org/10.3389/fgene.2018.00285>. PMID: 30100920
3. Asmat-Inostrosa, M. P., Valdés-Valdazo, J., & Robles, J. D. (2017). Intoxicación ocupacional por mercurio y la neurotoxicidad. *Revista de la Asociación Española de Especialistas en Medicina del Trabajo*, *26*(3), 206–211. https://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S3020-11602017000300206
4. Berntsson, E., Sardis, M., Noormägi, A., Jarvet, J., Roos, P. M., Tõugu, V., Gräslund, A., Palumaa, P., & Wärmländer, S. K. T. S. (2022). Mercury ion binding to apolipoprotein E variants ApoE2, ApoE3, and ApoE4: Similar binding affinities but different structure induction effects. *ACS Omega*, *7*(33), 28924–28931. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c02254>
5. *Boletín Minero*. (2026, January 29). UPME. <https://www.upme.gov.co/simco/boletin-minero>
6. Cerromatoso y los impactos ambientales y socioeconómicos por la extracción de níquel a las comunidades aledañas: una mirada a la sentencia T-733 de 2017. (2021, noviembre 10). *Derechos humanos y empresas*. <https://derechos-humanos-y-empresas.uexternado.edu.co/2021/11/10/cerromatoso-y-los-impactos-ambientales-y-socioeconomicos-por-la-extraccion-de-niquel-a-las-comunidades-aledanas-una-mirada-a-la-sentencia-t-733-de-2017/>
7. Collins, A. R. (2009). Investigating oxidative DNA damage and its repair using the comet assay. *Mutation Research*, *681*(1), 24–32. <https://doi.org/10.1016/j.mrrev.2007.10.002>
8. *Colombia 2019 EITI report*. (s/f). EITI. Recuperado el 30 de enero de 2026, de <https://eiti.org/documents/colombia-2019-eiti-report>.
9. *Convenio de Minamata*. (2017). UNDP. <https://www.undp.org/es/colombia/publicaciones/convenio-de-minamata>.
10. *Convenio de Minamata sobre Mercurio | Cancillería*. (2021). Cancillería.gov.co. <https://www.cancilleria.gov.co/convenio-minamata-sobre-mercurio>.

11. Das, K. K., Reddy, R. C., Bagoji, I. B., Das, S., Bagali, S., Mullur, L., Khodnapur, J. P., & Biradar, M. S. (2018). Primary concept of nickel toxicity - an overview. *Journal of Basic and Clinical Physiology and Pharmacology*, 30(2), 141–152. <https://doi.org/10.1515/jbcpp-2017-0171> PMID: 30179849
12. El Convenio de Minamata sobre el Mercurio. (2026, enero 30.). https://minamataconvention.org/sites/default/files/inline-files/informe_Minamata_LAC_ES_FINAL.pdf
13. El mercurio y la salud. Organización de las Naciones Unidas disponible : <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/mercury-and-health>
14. Espitia-Pérez, P., Espitia-Pérez, L., Peñata-Taborda, A., Brango, H., Pastor-Sierra, K., Galeano-Páez, C., Arteaga-Arroyo, G., Humanez-Alvarez, A., Rodríguez Díaz, R., Salas Osorio, J., Valderrama, L. A., & Saint'Pierre, T. D. (2025). Genetic damage and multi-elemental exposure in populations in proximity to artisanal and small-scale gold (ASGM) mining areas in North Colombia. *Toxics*, 13(3), 202. <https://doi.org/10.3390/toxics13030202>
15. Gates, A., Jakubowski, J. A., & Regina, A. C. (2023, May 20). *Nickel Toxicology*. Nih.gov; StatPearls Publishing. https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK592400/?utm_source=chatgpt.com
16. Gates, A., Jakubowski, J. A., & Regina, A. C. (2023). Nickel Toxicology. *StatPearls*. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37276284/>
17. Genchi, G., Carocci, A., Lauria, G., Sinicropi, M. S., & Catalano, A. (2020). Nickel: Human health and environmental toxicology. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(3), 679. <https://doi.org/10.3390/ijerph17030679>
18. Hoja de ruta: Sur de Córdoba PDET. (2025). Renovacionterritorio.gov.co. <https://www.renovacionterritorio.gov.co/especiales/hoja-ruta-pdet/sur-cordoba.html>
19. IARC Monographs hazard classification. (n.d.). Wwww.iarc.who.int. <https://www.iarc.who.int/infographics/iarc-monographs-classification>
20. Javier, F. (2015). *Históricos Producto Interno Bruto -PIB-*. Dane.gov.co. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/cuentas-nacionales/cuentas-nacionales-trimestrales/historicos-producto-interno-bruto-pib>
21. Pastor-Sierra, K., Espitia-Pérez, L., Espitia-Pérez, P., Peñata-Taborda, A., Brango, H., Galeano-Páez, C., Bru-Cordero, O. E., Palma-Parra, M., Díaz, S. M., Trillos, C., Briceño, L., Idrovo, Á. J., Miranda-Pacheco, J., Téllez, E., Jiménez-Vidal, L., Coneo-Pretelt, A., Álvarez, A. H., Arteaga-Arroyo, G., Ricardo-Caldera, D., ... Varona-Uribe, M. (2023). Micronuclei frequency and exposure to chemical mixtures in three Colombian mining populations. *The Science of the Total Environment*, 901(165789), 165789. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165789>.
22. *Lineamientos para el establecimiento de Minerales Estratégicos en Colombia*. (2023). https://www.anm.gov.co/sites/default/files/27-03-2023_Documento_Lineamientos_minerales.pdf.
23. Montoya, J. D. (2023, abril 23). Los principales recursos naturales de Colombia. *Desarrollo Sustentable*. <https://www.desarrollosustentable.co/recursos-naturales-de-colombia/>.
24. Boletín Económico Municipal, Antioquia 2023. Nechí. <https://www.udea.edu.co/wps/wcm/connect/udea/457fbba6-557c-4814-ad0e-8003caf903af/Nech%C3%AD.pdf?MOD=AJPERES&CVID=oXzv4W>
25. Nickel Compounds Hazard Summary (1992) Retrieved May 26, 2025, from https://www.epa.gov/sites/default/files/2016-09/documents/nickle-compounds.pdf?utm_source=chatgpt.com
26. Rehman, K., Fatima, F., Waheed, I., & Akash, M. S. H. (2018). Prevalence of exposure of heavy metals and their impact on health consequences. *Journal of Cellular Biochemistry*, 119(1), 157–184. <https://doi.org/10.1002/jcb.26234>
27. Renu, K., Chakraborty, R., Myakala, H., Koti, R., Famurewa, A. C., Madhyastha, H., Vellingiri, B., George, A., & Valsala Gopalakrishnan, A. (2021). Molecular mechanism of heavy metals (Lead, Chromium, Arsenic, Mercury, Nickel and Cadmium) - induced hepatotoxicity - A review. *Chemosphere*, 271(129735), 129735. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129735>

28. Roque, C. R., Sampaio, L. R., Ito, M. N., Pinto, D. V., Caminha, J. S. R., Nunes, P. I. G., Raposo, R. S., Santos, F. A., Windmüller, C. C., Crespo-Lopez, M. E., Alvarez-Leite, J. I., Oriá, R. B., & Pinheiro, R. F. (2021). Methylmercury chronic exposure affects the expression of DNA single-strand break repair genes, induces oxidative stress, and chromosomal abnormalities in young dyslipidemic APOE knockout mice. *Toxicology*, 464(152992), 152992. <https://doi.org/10.1016/j.tox.2021.152992>
29. Schiavo, B., Morton-Bermea, O., Meza-Figueroa, D., & Arredondo-Palacios, T. E. (2024). El mercurio como contaminante: fuentes, vías de exposición y efectos en la salud. *Epistemus (Sonora)*, 18(36). <https://doi.org/10.36790/epistemus.v18i36.306>
30. Sunderman, F. W., Jr. (1989). Mechanisms of nickel carcinogenesis. *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health*, 15(1), 1–12. <https://doi.org/10.5271/sjweh.1888>
31. Varona-Urbe, M. E., Díaz, S. M., Palma, R.-M., Briceño-Ayala, L., Trillos-Peña, C., Téllez-Avila, E. M., Espitia-Pérez, L., Pastor-Sierra, K., Espitia-Pérez, P. J., & Idrovo, A. J. (2023). Micronuclei, pesticides, and element mixtures in mining contexts: The hormetic effect of selenium. *Toxics*, 11(10), 821. <https://doi.org/10.3390/toxics11100821>