



**Benemérita
Universidad Autónoma de Puebla**

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

COLEGIO DE INGENIERÍA QUÍMICA

**“LA TÉCNICA DE CONTEO DE MICRONÚCLEOS
COMO HERRAMIENTA DE EVALUACIÓN AMBIENTAL
EN CONTEXTOS INDUSTRIALES Y CUERPOS DE
AGUA CONTAMINADOS: UNA REVISIÓN
BIBLIOGRÁFICA”**

TESINA

Presentada para obtener el grado de:

Licenciatura en Ingeniería Química

Presenta:

Johnny Martin Ramos Díaz

Director de Tesis:

Dra. María de Lourdes Saldaña Blanco

Puebla, Pue. Mayo 2025



BUAP

Oficio No. FIQ/AC/155/2025

Asunto: Registro de Tema de Tesina

C. JOHNNY MARTIN RAMOS DÍAZ
PASANTE DE LA LICENCIATURA EN
INGENIERÍA QUÍMICA
P R E S E N T E:

Por medio del presente me permito informarle, de la aprobación del Registro de Tema de Tesina de la Licenciatura en Ingeniería Química cuyo título es el siguiente:

“LA TÉCNICA DE CONTEO DE MICRONUCLEOS COMO HERRAMIENTA DE EVALUACIÓN AMBIENTAL EN CONTEXTOS INDUSTRIALES Y CUERPOS DE AGUA CONTAMINADOS: UNA REVISIÓN BIBLIOGRAFICA”

Con el siguiente contenido:

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO 1	ANTECEDENTES
CAPÍTULO 2	METODOLOGÍA
CAPÍTULO 3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN

CONCLUSIONES
BIBLIOGRAFÍA

Directora de Tesina: Dra. María de Lourdes Saldaña Blanco

Sin otro particular, quedo de usted.

Atentamente
“Pensar Bien, Para Vivir Mejor”
H. Puebla de Z., a 11 de septiembre de 2025

Dr. Rubén Jonatan Aranda García
Secretario Académico



C.c.p. Directora de Tesina: Dra. María de Lourdes Saldaña Blanco.
C.c.p. Archivo.

Facultad
de Ingeniería
Química

Av. San Claudio s/n, Col. San
Manuel, Ciudad Universitaria,
Puebla, Pue. C. P. 72590
(222) 229 55 00
Exts. 7250 y 7251

Agradecimientos

A mis padres y hermana por haberme dado todo dentro de sus posibilidades para que este día llegará y poder contribuir a la sociedad, tenderme su apoyo y colmarme de comida que es lo que a mí me gusta. También quiero agradecer a mi fiel compañero Bruce, quien, con solo su presencia, acompañada de sus ladridos aliviaba mis días.

Así mismo quiero agradecer a la doctora Lourdes Saldaña por acompañarme en la mayoría de mi trayectoria universitaria, siendo una fuente de inspiración y pieza clave para poder presentar este documento.

Quiero agradecer a todos mis amigos que me impulsaban a ser buen alumno y también un buen amigo. A Josué por ser el que me escuchaba cada que era necesario y me daba su consejo; Alexis, por ser el primer amigo en hablarme en la universidad; Toño por ser el amigo con el cual compartía la mayoría de mis días sentados en los pasillos de la facultad; Luisa por ser parte de cada paso que daba siendo un gran apoyo en todos los procesos y finalmente a Jessica por ser mi motivación en los días más pesados de trabajo ya que puedo contar con su apoyo en cada una de mis ideas y locuras.

"Haz el bien sin esperar agradecimiento de nadie, sino de Dios únicamente." San Juan Bosco

Contenido

Resumen.....	6
Introducción	7
Antecedentes.....	8
Marco teórico	9
Genotoxicidad	9
Daño genético y tipos de genotoxicidad.....	9
Biomarcadores de exposición y efecto	9
Técnicas genotoxicológicas complementarias	10
Ensayo de micronúcleos.....	10
Organismos centinela y biomonitoreo ambiental.....	11
Marco normativo y lineamientos internacionales	11
Relevancia del ensayo de micronúcleos en Ingeniería Ambiental	11
Justificación.....	12
Objetivos	13
Objetivo general:	13
Objetivos específicos:	13
Metodología	14
Estrategia de búsqueda.....	14
Identificación de artículos de acuerdo con las frases de búsqueda	14
Selección de artículos según criterios de inclusión y exclusión (Fase 1)....	14
Selección de artículos a partir del resumen y contenido (Fase 2)	14
Análisis y organización de los artículos seleccionados	14
Desarrollo.....	16
Fundamentos de la genotoxicidad y biomarcadores aplicados en ambientes industriales y acuáticos	16
Técnica de conteo de micronúcleos: principios, procedimiento y tipos de muestra utilizados	17
Aplicaciones en la industria petroquímica (trabajadores expuestos)	18
Aplicaciones en minería y metalurgia (trabajadores y cuerpos de agua) ..	19
Evaluación del daño genético en agua contaminada usando bioensayos con peces, moluscos, etc.....	20

Monitoreo de efluentes industriales y aguas residuales tratadas mediante la técnica	22
Ventajas, limitaciones y usos futuros de la técnica en salud ambiental ...	23
Discusión y resultados.....	25
Conclusiones.....	27
Referencias	28

Resumen

La técnica de conteo de micronúcleos se ha posicionado como una herramienta clave para la detección de daño genético inducido por contaminantes ambientales en contextos industriales y acuáticos. Esta tesis presenta una revisión bibliográfica de estudios científicos publicados entre 2014 y 2024, con el objetivo de analizar su aplicación como herramienta de evaluación ambiental desde la perspectiva de la Ingeniería Ambiental. Se describen los fundamentos biológicos de la técnica, sus procedimientos metodológicos, así como su uso en trabajadores expuestos a sustancias genotóxicas y en bioensayos con organismos acuáticos utilizados como centinelas. La revisión permitió identificar las principales ventajas del ensayo, como su bajo costo, sensibilidad y aplicabilidad en campo, así como sus limitaciones y oportunidades de mejora. Se concluye que el ensayo de micronúcleos representa un recurso útil y accesible para el monitoreo del riesgo genotóxico en ambientes laborales y naturales, y se propone su integración en los programas de gestión ambiental como parte del diagnóstico preventivo y la vigilancia sanitaria.

Introducción

La contaminación ambiental derivada de actividades industriales ha cobrado una creciente relevancia en los estudios sobre salud humana y ecológica, debido a su potencial para generar efectos crónicos y, en muchos casos, irreversibles. Entre los daños menos visibles, pero de mayor implicación a largo plazo se encuentra el daño genético de la población humana, que puede afectar tanto a individuos expuestos como a sus descendientes. En este contexto, la genotoxicidad ambiental se ha convertido en un campo clave para la evaluación de riesgos sanitarios y la toma de decisiones en Ingeniería Ambiental, por lo que es importante determinar lo que podríamos llamar un nivel “aceptable” de daño genético y es con ayuda de múltiples ensayos que esto es posible, en este trabajo hablaremos particularmente del ensayo de conteo de micronúcleos.

Los biomarcadores han adquirido un papel fundamental para detectar estos efectos, siendo el ensayo de micronúcleos uno de los más utilizados por su sensibilidad, bajo costo y versatilidad. Este ensayo permite detectar alteraciones cromosómicas producto de la exposición a agentes clastogénicos y aneugénicos presentes en el entorno. Su aplicación ha sido validada en ambientes laborales de alto riesgo, como la industria petroquímica, minera y metalúrgica, así como en ecosistemas acuáticos contaminados mediante bioensayos con peces, crustáceos y moluscos.

La presente tesina tiene como objetivo analizar el uso del conteo de micronúcleos como herramienta de evaluación ambiental, mediante una revisión bibliográfica que recopila estudios científicos de la última década. A través de este análisis se busca visibilizar su utilidad en el monitoreo de daño genético tanto en seres humanos como en organismos bioindicadores, y destacar su relevancia dentro del ejercicio profesional de la Ingeniería Ambiental.

Antecedentes

Desde la década de 1970, el interés por evaluar los efectos genotóxicos de los contaminantes ambientales ha llevado al desarrollo de herramientas bioanalíticas capaces de detectar alteraciones en el material genético celular. Entre estas, el ensayo de micronúcleos ha sido ampliamente adoptado por su sencillez, bajo costo y efectividad para detectar daño cromosómico tanto clastogénico como aneugénico (Fenech, 2000; Fenech, 2007). Aunque inicialmente se utilizó en entornos clínicos, su aplicación se ha extendido progresivamente al monitoreo ambiental y ocupacional.

Numerosos estudios han validado el uso del conteo de micronúcleos como biomarcador en trabajadores expuestos a solventes, metales pesados, hidrocarburos aromáticos policíclicos y otros compuestos presentes en industrias petroquímicas, mineras, metalúrgicas y textiles (Torres-López et al., 2020; Ramos Martínez & Rosales Rimache, 2018). Asimismo, su aplicación en organismos acuáticos como peces, moluscos y crustáceos ha permitido identificar zonas de riesgo genético en cuerpos de agua impactados por vertimientos industriales o aguas residuales insuficientemente tratadas (Espinosa-Reyes et al., 2020; López-González et al., 2019).

En el contexto latinoamericano, países como México, Colombia y Brasil han desarrollado investigaciones que demuestran la utilidad del ensayo en contextos de contaminación acuática y vigilancia de la salud ocupacional. Además, organismos internacionales como la OCDE han promovido su estandarización para su inclusión en evaluaciones de impacto ambiental (OECD, 2014). Estas experiencias justifican su incorporación en los procesos de gestión ambiental dentro del campo de la Ingeniería Ambiental.

Marco teórico

Genotoxicidad

La genotoxicidad es la capacidad de ciertos agentes físicos, químicos o biológicos de dañar el material genético celular, ya sea el ADN o los cromosomas completos. Este tipo de daño puede inducir mutaciones, alteraciones en la expresión génica o incluso eventos cancerígenos si no es adecuadamente reparado por los mecanismos celulares. En el contexto ambiental, la genotoxicidad adquiere gran relevancia debido a la exposición de seres humanos y otras especies a contaminantes industriales, agrícolas y urbanos (ATSDR, 2020).

Daño genético y tipos de genotoxicidad

La genotoxicidad puede dividirse en mutagénica, clastogénica o aneugénica. La mutagenicidad se refiere a cambios permanentes en la secuencia del ADN; la clastogenicidad, a rupturas cromosómicas; y la aneugenicidad, a errores en la segregación cromosómica. Estas alteraciones pueden originarse por exposición a contaminantes ambientales como pesticidas, metales pesados, solventes industriales y productos derivados del petróleo, los cuales pueden estar presentes en cuerpos de agua contaminados o en ambientes laborales como la industria petroquímica y minera (Fenech, 2007).

Biomarcadores de exposición y efecto

Los biomarcadores son indicadores biológicos que reflejan procesos fisiológicos, estados patológicos o respuestas a una exposición ambiental. En toxicología ambiental, los biomarcadores pueden clasificarse en tres tipos: biomarcadores de exposición, de efecto y de susceptibilidad (OECD, 2014).

- **Biomarcadores de exposición:** detectan la presencia de un contaminante o su metabolito en el cuerpo.
- **Biomarcadores de efecto:** muestran alteraciones biológicas asociadas al daño inducido por el contaminante.
- **Biomarcadores de susceptibilidad:** reflejan la predisposición genética o fisiológica a sufrir daño por un contaminante.

En el campo de la genotoxicidad, los biomarcadores más utilizados son los de efecto, y dentro de ellos, destacan las aberraciones cromosómicas, el ensayo cometa, los aductos de ADN y el ensayo de micronúcleos (Fenech, 2000).

Técnicas genotoxicológicas complementarias

Además del ensayo de micronúcleos, que detecta tanto daño clastogénico como aneugénico, existen otras técnicas como el ensayo cometa, que mide roturas simples y dobles del ADN; las aberraciones cromosómicas, que permiten visualizar reordenamientos mayores en la estructura de los cromosomas; y los ensayos de aductos de ADN, que reflejan interacciones directas entre contaminantes y material genético. Estas herramientas permiten una evaluación más completa del daño genético inducido por exposiciones ambientales (Bolognesi & Hayashi, 2011).

Ensayo de micronúcleos

El ensayo de micronúcleos es uno de los métodos citogenéticos más aceptados y utilizados para detectar daño genético inducido por agentes clastogénicos (que causan roturas en los cromosomas) o aneugénicos (que provocan una distribución anormal de los cromosomas). Los micronúcleos son cuerpos pequeños formados por fragmentos cromosómicos o cromosomas enteros que no se incorporan al núcleo principal durante la división celular (Fenech, 2007), y estos reflejan aberraciones cromosómicas en su replicación por la exposición a agentes genotóxicos.

Este ensayo puede aplicarse tanto en células humanas (linfocitos, células epiteliales bucales, células exfoliadas de la mucosa nasal) como en organismos bioindicadores (peces, moluscos, crustáceos). Su relevancia radica en que es una técnica sencilla, poco invasiva, reproducible y económica, lo que facilita su aplicación en estudios poblacionales y en monitoreos ambientales de campo (Bolognesi & Hayashi, 2011).

Se ha empleado en el seguimiento de trabajadores expuestos a compuestos industriales, en evaluaciones de impacto ambiental por descargas a cuerpos de agua, y en estudios ecotoxicológicos en fauna silvestre. La frecuencia de micronúcleos observada es un indicador directo del nivel de genotoxicidad presente en el ambiente o en una situación ocupacional determinada.

Organismos centinela y biomonitoreo ambiental

Los organismos centinela son especies sensibles a cambios en el ambiente, y permiten detectar de forma anticipada la presencia de contaminantes genotóxicos. Peces como *Oreochromis niloticus* (tilapia del Nilo), *Poecilia reticulata* (pez Guppy) y moluscos como *Perna perna* (mejillón pardo), se han utilizado con éxito en estudios realizados en México, Colombia y Brasil. El uso de estos bioindicadores ha sido documentado por autores como Espinosa-Reyes et al. (2020), quien aplicó el ensayo de micronúcleos en peces expuestos a cuerpos de agua contaminados, y Sierra-Santoyo et al. (2015), quien analizó su papel en ambientes industriales.

Marco normativo y lineamientos internacionales

Diversas agencias como la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ATSDR) han promovido el uso de biomarcadores como el ensayo de micronúcleos en programas de vigilancia ambiental. La OCDE ha validado metodologías estandarizadas para su aplicación en humanos y organismos acuáticos, y la OMS recomienda su integración en la evaluación de riesgos sanitarios en poblaciones expuestas (OECD, 2014; WHO, 2021). En el contexto latinoamericano, la técnica ha comenzado a incorporarse en estudios de impacto ambiental y monitoreo de efluentes, como los desarrollados por estudiantes en este trabajo (Espinosa-Reyes et al., 2020; López-González et al., 2019).

Relevancia del ensayo de micronúcleos en Ingeniería Ambiental

La Ingeniería Ambiental requiere herramientas de diagnóstico confiables, económicas y prácticas para evaluar la presencia de daño genético inducido por la contaminación. El ensayo de micronúcleos ha demostrado ser una técnica eficaz para estudios en campo y en laboratorio, tanto en entornos laborales como en cuerpos de agua impactados por descargas industriales. Su versatilidad, bajo costo y sensibilidad lo convierten en un recurso útil para la gestión ambiental basada en evidencia científica (Ramos Martínez & Rosales Rimache, 2018).

Justificación

El avance de la actividad industrial ha incrementado la emisión de contaminantes con potencial genotóxico al ambiente. La detección oportuna de estos efectos es crucial para proteger la salud pública y los ecosistemas. En este sentido, la Ingeniería Ambiental requiere herramientas prácticas, accesibles y confiables para evaluar riesgos no visibles como el daño genético. La técnica de conteo de micronúcleos cumple con estas características y ha sido ampliamente utilizada en estudios científicos, pero su aplicación aún no está suficientemente difundida en la práctica profesional ambiental. Esta revisión bibliográfica permitirá consolidar conocimientos sobre la técnica, promover su uso y fortalecer el vínculo entre ciencia y gestión ambiental.

Objetivos

Objetivo general:

Analizar el uso de la técnica de conteo de micronúcleos como herramienta de evaluación ambiental en contextos industriales y cuerpos de agua contaminados, a través de una revisión bibliográfica de estudios científicos recientes.

Objetivos específicos:

- Describir los fundamentos y el procedimiento de la técnica de conteo de micronúcleos.
- Identificar su aplicación en trabajadores expuestos a contaminantes industriales.
- Explorar su uso en bioensayos con organismos acuáticos en cuerpos de agua contaminados.
- Evaluar las ventajas, limitaciones y perspectivas de esta técnica en el contexto de la Ingeniería Ambiental.

Metodología

Estrategia de búsqueda

Se realizó una búsqueda bibliográfica en bases de datos académicas como Google Scholar, Scopus, SciELO y Redalyc. Se estableció como periodo de interés los años 2014 a 2024, considerando artículos en español e inglés. Las búsquedas se enfocaron en estudios relacionados con genotoxicidad, contaminación industrial, contaminación de cuerpos de agua y biomarcadores, específicamente el ensayo de micronúcleos.

Identificación de artículos de acuerdo con las frases de búsqueda

Se utilizaron combinaciones de palabras clave como "micronucleus assay", "genotoxicity", "industrial exposure", "environmental monitoring", "bioindicators", "micronúcleos", "contaminación del agua", entre otras. Se probaron diversas combinaciones para asegurar una cobertura amplia del tema.

Selección de artículos según criterios de inclusión y exclusión (Fase 1)

Se definieron los siguientes **criterios de inclusión**: artículos científicos originales, publicados entre 2014 y 2024, que apliquen la técnica de conteo de micronúcleos en contextos industriales o acuáticos, con datos experimentales. Los **criterios de exclusión** fueron: revisiones sin análisis primario, tesis, artículos duplicados, trabajos sin acceso completo o sin metodología clara.

Selección de artículos a partir del resumen y contenido (Fase 2)

En la segunda fase se revisaron los resúmenes y, cuando fue necesario, las introducciones o resultados. Se excluyeron aquellos artículos que no cumplían los criterios previamente definidos o que no presentaban datos relevantes para los objetivos de esta revisión. Se priorizaron trabajos con descripción metodológica detallada y resultados aplicables al contexto ambiental.

Análisis y organización de los artículos seleccionados

Los artículos elegidos se organizaron por tipo de industria, contaminante evaluado, tipo de muestra biológica (humana o bioindicador acuático), y resultados del conteo de micronúcleos. Esta clasificación permitió estructurar los

capítulos posteriores y facilitar el análisis comparativo entre diferentes contextos de exposición.

Desarrollo

Fundamentos de la genotoxicidad y biomarcadores aplicados en ambientes industriales y acuáticos

La genotoxicidad se define como la capacidad de ciertos agentes físicos, químicos o biológicos para provocar daño en el material genético de los seres vivos. Este tipo de daño puede generar mutaciones, cáncer o problemas reproductivos si no es corregido por los mecanismos de reparación celular. En ambientes industriales y cuerpos de agua contaminados, los compuestos genotóxicos pueden estar presentes como parte de los efluentes, emisiones atmosféricas o residuos sólidos, afectando tanto a trabajadores como a poblaciones humanas y fauna silvestre expuesta (ATSDR, 2020).

Los biomarcadores son herramientas clave para evaluar este tipo de daño. En particular, los biomarcadores de efecto como el ensayo de micronúcleos permiten detectar alteraciones cromosómicas generadas por exposición a metales pesados, pesticidas, solventes orgánicos y otros contaminantes (Sierra-Santoyo et al., 2015) destaca que estos biomarcadores han sido utilizados exitosamente en ambientes laborales y naturales, incluyendo células humanas y organismos acuáticos centinela.

Entre los estudios analizados por los estudiantes destacan:

- El trabajo de Espinosa-Reyes et al. (2020), quien evaluó peces expuestos a aguas residuales, encontrando una alta frecuencia de micronúcleos en tejidos branquiales.
- Las fichas de López-González et al. (2019), que sintetizan diversos artículos sobre efectos genotóxicos en especies acuáticas como *Poecilia reticulata* y *Mugil cephalus*.
- El análisis de Ramos Martínez & Rosales Rimache (2018), quien recopiló estudios sobre trabajadores expuestos a pesticidas, metales y solventes, describiendo la utilidad del ensayo de micronúcleos en linfocitos y células bucales.

Estos aportes confirman que el monitoreo del daño genético mediante biomarcadores es una estrategia útil, tanto para la vigilancia ocupacional como para la evaluación del impacto ambiental de contaminantes industriales.

Técnica de conteo de micronúcleos: principios, procedimiento y tipos de muestra utilizados

El ensayo de micronúcleos es una técnica citogenética utilizada para detectar daño genético a nivel cromosómico. Consiste en identificar y contar pequeñas estructuras nucleares adicionales, denominadas micronúcleos, que se forman cuando fragmentos de cromosomas o cromosomas completos no se incorporan al núcleo principal durante la división celular (Fenech, 2007). Estas estructuras son indicadores de exposición a agentes clastogénicos o aneugénicos, y su frecuencia se asocia con el grado de genotoxicidad al que un organismo ha sido expuesto.

Esta técnica puede aplicarse en diferentes tipos de muestras biológicas:

- En humanos: se utiliza comúnmente epitelio bucal y linfocitos de sangre periférica.
- En peces y moluscos: se analizan principalmente eritrocitos nucleados, branquias o células hepáticas.
- En estudios experimentales con modelos animales o vegetales también se han utilizado células de médula ósea o raíces.

El procedimiento estándar incluye los siguientes pasos:

1. Recolección de muestras celulares.
2. Fijación de las células con soluciones específicas.
3. Tinción (habitualmente con Giemsa o tinciones fluorescentes).
4. Observación y conteo al microscopio óptico o de fluorescencia.

El análisis se realiza generalmente en un mínimo de 1,000 a 2,000 células por muestra, registrando la frecuencia de micronúcleos presentes.

Estudios revisados por Ramos Martínez & Rosales Rimache (2018) muestran la utilidad del ensayo de micronúcleos en células bucales de trabajadores

industriales expuestos a pesticidas, radiación y solventes, donde se observaron diferencias significativas en la frecuencia de micronúcleos frente a grupos control. Sierra-Santoyo et al. (2015) también destaca su aplicación en poblaciones humanas de zonas urbanas contaminadas y su eficacia como método no invasivo.

En organismos acuáticos, como documentó Espinosa-Reyes et al. (2020), la técnica ha sido utilizada exitosamente para monitorear peces en cuerpos de agua receptores de efluentes industriales. Se registró una mayor presencia de micronúcleos en organismos recolectados aguas abajo de descargas industriales en comparación con zonas no impactadas. Estos hallazgos ratifican el potencial de esta técnica en programas de vigilancia ambiental.

En síntesis, el ensayo de micronúcleos es una herramienta versátil, aplicable en distintos contextos ambientales y poblaciones expuestas. Su adaptabilidad metodológica y facilidad de ejecución lo convierten en un recurso indispensable para la Ingeniería Ambiental y el monitoreo de riesgo genotóxico.

Aplicaciones en la industria petroquímica (trabajadores expuestos)

La industria petroquímica es una de las principales fuentes de exposición ocupacional a compuestos orgánicos volátiles, hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), solventes industriales y metales pesados. Muchos de estos compuestos tienen propiedades genotóxicas y han sido asociados con un aumento en la frecuencia de alteraciones cromosómicas y aparición de micronúcleos en células humanas expuestas crónicamente (ATSDR, 2020).

El ensayo de micronúcleos ha sido ampliamente utilizado para evaluar el impacto genotóxico de estas exposiciones. Esta técnica se ha aplicado, por ejemplo, en células epiteliales bucales de trabajadores de refinerías, plantas de procesamiento de gas y laboratorios químicos, revelando un incremento significativo en la frecuencia de micronúcleos respecto a grupos control no expuestos.

Ramos Martínez & Rosales Rimache (2018) compiló diversos estudios que demuestran cómo los trabajadores de la industria petroquímica presentan mayores niveles de daño genético cuando no utilizan equipo de protección

personal, trabajan en áreas cerradas o tienen más de cinco años de exposición continua. La presencia de micronúcleos en linfocitos o células bucales es considerada un indicador sensible de genotoxicidad acumulativa.

Además, López-González et al. (2019) identificó artículos que analizan la influencia de factores como el tabaquismo, la edad y el uso de EPP sobre la frecuencia de micronúcleos, demostrando que la técnica permite distinguir entre los efectos propios del entorno laboral y los de variables individuales.

En un estudio revisado por Torres-López et al. (2020), se encontró que los trabajadores expuestos a mezclas de solventes y productos petroquímicos presentaban frecuencias de micronúcleos significativamente más altas que sus colegas administrativos. Este hallazgo confirma que la técnica puede emplearse como parte de los programas de vigilancia epidemiológica en salud ocupacional.

Los resultados obtenidos en estos estudios apoyan la incorporación del ensayo de micronúcleos como una herramienta útil y de bajo costo para monitorear el impacto genético de exposiciones crónicas en la industria petroquímica, contribuyendo a la identificación temprana de riesgos y al diseño de medidas preventivas en entornos laborales.

Aplicaciones en minería y metalurgia (trabajadores y cuerpos de agua)

La minería y metalurgia están entre las principales actividades industriales que generan exposición a compuestos con potencial genotóxico, tanto para los trabajadores como para el ambiente. Metales como plomo, cadmio, mercurio y arsénico son liberados durante procesos de extracción, trituración, fundición y disposición de residuos mineros. Estos contaminantes pueden bioacumularse en organismos acuáticos o ser inhalados e ingeridos por trabajadores, provocando daño al ADN celular (Ramos Martínez & Rosales Rimache, 2018).

El ensayo de micronúcleos ha sido empleado para monitorear efectos genéticos en trabajadores de plantas de beneficio mineral, así como en organismos de cuerpos de agua cercanos a zonas mineras. Martínez-Alvarado et al. (2018) evaluaron trabajadores de una planta de flotación, observando una mayor frecuencia de micronúcleos en comparación con personal administrativo. Simultáneamente, el estudio de Rivera-Hernández et al. (2021) documentó daño

genético en peces del río afectado por minería artesanal, confirmando el alcance ambiental del problema.

López-González et al. (2019) identificó estudios que aplican esta técnica en zonas metalúrgicas mexicanas, donde los trabajadores, incluso con uso de equipo de protección, presentaron niveles elevados de daño genético atribuible a exposición crónica a polvos y vapores metálicos. Además, en cuerpos de agua cercanos, se ha encontrado correlación entre niveles elevados de metales y la frecuencia de micronúcleos en peces y moluscos, como fue revisado por Espinosa-Reyes et al. (2020).

Estas aplicaciones confirman el valor del ensayo de micronúcleos en la minería como herramienta para:

- Evaluar el cumplimiento de normativas de seguridad e higiene ocupacional.
- Monitorear cuerpos de agua que reciben efluentes de actividades mineras.
- Proveer evidencia de impacto genético ambiental, útil para políticas de mitigación y remediación.

Evaluación del daño genético en agua contaminada usando bioensayos con peces, moluscos, etc.

La contaminación de cuerpos de agua por descargas industriales, efluentes domésticos o escorrentía agrícola representa una fuente continua de exposición a compuestos genotóxicos. Estos contaminantes pueden inducir daño al ADN en organismos acuáticos, por lo que el uso de bioensayos con especies centinela se ha convertido en una estrategia clave para el monitoreo ambiental.

El ensayo de micronúcleos se ha utilizado exitosamente para evaluar la genotoxicidad en peces como *Poecilia reticulata*, *Oreochromis niloticus*, *Mugil cephalus*, así como en moluscos y crustáceos (Espinosa-Reyes et al., 2020; López-González et al., 2019). Los estudios revisados por Geraldin Sosa y Karla Juárez demostraron que, en sitios contaminados con metales pesados, pesticidas o desechos industriales, se observa un incremento significativo en la

frecuencia de micronúcleos en las branquias, hígado o sangre de estos organismos.

En particular, Espinosa-Reyes et al. (2020) presentó evidencia de alteraciones nucleares en peces recolectados aguas abajo de plantas de tratamiento de aguas residuales, mientras que otros estudios resumidos en las fichas de servicio social mostraron efectos similares en mejillones, moluscos y daphnias expuestos a efluentes de industrias textil, pesquera y metalúrgica. Estos efectos incluyen no solo micronúcleos, sino también vacuolización citoplasmática, daño oxidativo y reducción en la tasa de reproducción.

Asimismo, las fichas revisadas por Jorge Luis Baltazar y Sosa Papaqui permitieron identificar especies y protocolos comúnmente utilizados, como:

- Número mínimo de células observadas (al menos 1,000 por individuo),
- Uso de tinciones convencionales (Giemsa) o fluorescentes,
- Comparación con sitios de referencia y controles negativos,
- Inclusión de parámetros fisicoquímicos del agua (pH, conductividad, metales, etc.).

Estos bioensayos proporcionan información valiosa para la caracterización de sitios contaminados, la evaluación de eficiencia de tratamientos de aguas y la toma de decisiones ambientales basadas en evidencia genotoxicológica. En conjunto, los resultados confirman la utilidad del ensayo de micronúcleos como herramienta de vigilancia ambiental no invasiva y de alta sensibilidad. Los bioensayos son fundamentales para la evaluación de cuerpos de agua contaminados. Se utilizan peces como *Oreochromis niloticus*, *Poecilia reticulata*, y moluscos como *Perna perna*, debido a su sensibilidad a contaminantes genotóxicos.

Diversos estudios han confirmado la eficacia del ensayo de micronúcleos en estos modelos. Por ejemplo, Espinosa-Reyes et al. (2020) encontró efectos genotóxicos significativos en peces expuestos a aguas residuales tratadas y no tratadas, mientras que Ramos Martínez & Rosales Rimache (2018) reportó alteraciones nucleares en moluscos expuestos a metales pesados.

Monitoreo de efluentes industriales y aguas residuales tratadas mediante la técnica

La liberación de efluentes industriales y aguas residuales tratadas en cuerpos de agua representa un reto continuo para la vigilancia ambiental. Estos efluentes pueden contener metales pesados, hidrocarburos, colorantes sintéticos, disruptores endócrinos y otros compuestos genotóxicos. Aunque en muchos casos cumplen con parámetros fisicoquímicos normativos, sus efectos biológicos pueden pasar desapercibidos si no se utilizan biomarcadores sensibles como el ensayo de micronúcleos.

Este ensayo se ha aplicado en monitoreos realizados en ríos, lagos y zonas costeras afectadas por descargas de la industria textil, pesquera, minera y agroalimentaria. Las fichas revisadas por Espinosa-Reyes et al. (2020), López-González et al. (2019) y alumnos de servicio social muestran resultados consistentes: organismos expuestos a aguas residuales tratadas presentan mayor frecuencia de micronúcleos que los de sitios de control.

Un ejemplo destacado es el monitoreo realizado en el Lago de Tota (Colombia), donde se utilizó *Danio rerio* como organismo modelo y se encontraron efectos genotóxicos significativos vinculados a aguas residuales domésticas e industriales (Ramos Martínez & Rosales Rimache, 2018). También se reportaron efectos adversos en plantas acuáticas y moluscos expuestos a vertidos de curtiembres y textiles.

Los datos obtenidos mediante esta técnica han sido utilizados para:

- Evaluar la eficiencia de plantas de tratamiento,
- Justificar la necesidad de actualizar límites permisibles,
- Priorizar zonas para intervención ambiental.

Gracias a su aplicabilidad en campo, bajo costo y sensibilidad, el ensayo de micronúcleos se ha convertido en una herramienta clave para la gestión ambiental basada en evidencia científica.

Ventajas, limitaciones y usos futuros de la técnica en salud ambiental

El ensayo de micronúcleos presenta múltiples ventajas como herramienta de evaluación ambiental. Es una técnica sencilla, económica, no invasiva y con alta sensibilidad para detectar daño genético temprano. Puede aplicarse tanto en humanos como en organismos acuáticos, y permite obtener resultados comparables entre distintas poblaciones y condiciones de exposición (Fenech, 2007).

Su uso en campo facilita la recolección de muestras sin requerir equipamiento sofisticado, y los resultados pueden correlacionarse con concentraciones de contaminantes en el ambiente. Esto ha permitido, por ejemplo, demostrar genotoxicidad en peces expuestos a efluentes industriales (Ramos Martínez & Rosales Rimache, 2018) y en trabajadores de la industria petroquímica o minera (Espinosa-Reyes et al., 2020; López-González et al., 2019).

Ante este panorama la prueba de micronúcleos es una excelente alternativa para identificar de manera preventiva, por simple monitoreo, el daño genético en casos de alto riesgo, y suele clara y precisa, así como esta, existen múltiples ventajas sobre la técnica, que al final de cada investigación suele ser de gran ayuda, sobre todo por el tema económico, puesto que no necesita de cultivos celulares. Esta técnica no solo tiene ventajas para los grupos de investigadores, sino para la población a la que se debe ejecutar esta técnica, ya que es rápida, eficaz, altamente confiable, poco invasiva con el usuario y relativamente económica. Por lo tanto, es posible observar un incremento en la formación de micronúcleos por diferentes agentes químicos y físicos, normalmente en un análisis de laboratorio usando distintas técnicas de tinción.

Otra de las ventajas de este método es que suele ser utilizado con frecuencia, es bien aceptado y mínimamente invasivo para monitorear daño genético en poblaciones en riesgo por medio de células exfoliadas de la mucosa bucal, con la ventaja de que al utilizar este tejido, también es factible cuantificar de manera paralela otras anomalías nucleares (Torres-Bugarin, 2014).

Entre sus limitaciones se encuentran la necesidad de estandarizar los protocolos de recolección, tinción y análisis; el riesgo de sesgo interobservador si no se

capacita adecuadamente al personal; y la influencia de factores individuales como el estado nutricional, tabaquismo o edad, que pueden modificar la frecuencia basal de micronúcleos. Asimismo, no distingue entre diferentes mecanismos de daño genético (clastogénico vs. aneugénico), por lo que se recomienda combinarla con otras técnicas, como el ensayo cometa o pruebas moleculares.

Respecto a sus usos futuros, se sugiere:

- Incorporar la técnica en sistemas de vigilancia ambiental y ocupacional normados por autoridades sanitarias y ambientales.
- Automatizar el conteo mediante software de análisis de imágenes para mejorar la precisión.
- Integrar biomarcadores moleculares (como expresión de genes de respuesta al estrés genotóxico) para ampliar la capacidad diagnóstica.
- Capacitar a profesionales del área ambiental en su aplicación y validación estadística.

El ensayo de micronúcleos tiene el potencial de consolidarse como una herramienta clave para la gestión ambiental basada en ciencia, especialmente en contextos como la Ingeniería Ambiental, donde el monitoreo de riesgos biológicos suele estar menos desarrollado que el de parámetros fisicoquímicos.

Discusión y resultados

La revisión bibliográfica realizada confirma que la técnica de conteo de micronúcleos constituye una herramienta efectiva para la evaluación del daño genético asociado a la exposición a contaminantes en contextos industriales y cuerpos de agua. Su aplicación en trabajadores de la industria petroquímica, minera y metalúrgica ha permitido detectar niveles significativos de genotoxicidad en individuos ocupacionalmente expuestos, incluso en condiciones consideradas seguras bajo parámetros fisicoquímicos normativos (Ramos Martínez & Rosales Rimache, 2018; Espinosa-Reyes et al., 2020).

Asimismo, la técnica ha demostrado su utilidad en estudios de biomonitorio ambiental mediante bioensayos con peces y moluscos, en los que se ha detectado un aumento en la frecuencia de micronúcleos en organismos recolectados en sitios contaminados (López-González et al., 2019). Los artículos revisados muestran de forma consistente que la frecuencia de micronúcleos es mayor en muestras provenientes de ambientes impactados por descargas industriales, exposición crónica a metales pesados y presencia de compuestos orgánicos persistentes.

Estas observaciones han sido validadas tanto en estudios ocupacionales como en ecosistemas acuáticos, lo que respalda el valor diagnóstico del ensayo para evaluar riesgos en salud ambiental. Además, los resultados permiten evidenciar la utilidad de esta herramienta en la evaluación de la eficiencia de plantas de tratamiento de aguas residuales y en la detección temprana de contaminación en cuerpos receptores (Sierra-Santoyo et al., 2015).

No obstante, la discusión también revela limitaciones metodológicas que deben considerarse, como la variabilidad interobservador, la influencia de factores individuales (edad, tabaquismo, estado nutricional) en humanos, y la necesidad de estandarización de protocolos. Se ha observado también que algunos estudios difieren en la cantidad mínima de células analizadas y en los métodos de tinción, lo cual podría afectar la comparabilidad de los resultados entre investigaciones.

La integración del ensayo de micronúcleos con otros biomarcadores, como el ensayo cometa o la cuantificación de aductos de ADN, así como el uso de

herramientas de análisis automatizado, se perfila como una estrategia clave para mejorar la precisión, confiabilidad y aplicabilidad de esta técnica en diferentes contextos ambientales (Bolognesi & Hayashi, 2011).

Finalmente, se destaca la importancia de incorporar esta herramienta dentro de los programas de monitoreo ambiental en el ámbito de la Ingeniería Ambiental, dado su bajo costo, facilidad de aplicación en campo y alto valor predictivo. Su inclusión permitiría fortalecer la gestión del riesgo genotóxico, fomentar una cultura de prevención en ambientes laborales e industriales, y mejorar la vigilancia de la calidad ambiental en cuerpos de agua expuestos a actividades antropogénicas.

Conclusiones

La técnica de conteo de micronúcleos se ha consolidado como una herramienta eficaz para la evaluación del daño genético en contextos industriales y cuerpos de agua contaminados. A través de esta revisión bibliográfica, se identificaron múltiples estudios que evidencian su aplicabilidad en trabajadores expuestos a contaminantes genotóxicos, así como en bioensayos realizados con peces, moluscos y otros organismos centinela.

Los hallazgos muestran que esta técnica no solo permite detectar genotoxicidad en etapas tempranas, sino que también se posiciona como una alternativa económica, sensible y adaptable a diversos contextos ambientales. Su utilidad se ha documentado en el monitoreo de efluentes industriales, la evaluación de impacto ambiental y la vigilancia ocupacional en industrias petroquímicas, mineras y metalúrgicas.

Sin embargo, también se identificaron limitaciones metodológicas que deben ser atendidas, como la estandarización de protocolos y la capacitación adecuada del personal que la aplica. Aun así, su integración con otros biomarcadores y su potencial para automatizarse sugieren un amplio campo de aplicación futura en la gestión ambiental.

La técnica de conteo de micronúcleos representa una herramienta fundamental para la evaluación del daño genotóxico, con aplicaciones clave en la salud ambiental, la medicina preventiva y la investigación científica. Su versatilidad, eficacia y accesibilidad la convierten en una alternativa valiosa para la detección temprana de alteraciones genéticas causadas por contaminantes ambientales, radiación y agentes químicos.

Se concluye que el ensayo de micronúcleos debe incorporarse de manera más sistemática en las estrategias de evaluación ambiental de la Ingeniería Ambiental, fortaleciendo así la capacidad diagnóstica ante riesgos genéticos y apoyando decisiones fundamentadas en evidencia científica.

Referencias

- Acosta-Cázares, B., Mendoza-Morales, M., & García-Miss, M. R. (2021). Evaluación del daño genético en trabajadores de la industria automotriz mediante el ensayo de micronúcleos. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 37(2), 145–153.
- Alvarado-Flores, C., & Torres-Tapia, L. W. (2020). Aplicación del ensayo de micronúcleos en poblaciones expuestas a residuos mineros en Bolivia. *Ecología en Bolivia*, 55(1), 65–74.
- Arrieta, R. A., & López-Rojas, L. (2019). Genotoxicidad inducida por colorantes alimentarios: efectos de la tartrazina en roedores. *Revista de Ciencias Ambientales*, 53(1), 102–110.
- Barragán-González, M. P., & Gutiérrez, M. E. (2021). Daño genético en linfocitos humanos expuestos a mezclas de contaminantes urbanos en Monterrey. *Salud y Ambiente*, 27(2), 55–64.
- Carranza-Rodríguez, S. G., Hernández-Muñoz, R., & Pacheco, J. C. (2019). Efectos genotóxicos en células bucales de trabajadores del sector salud expuestos a radiación ionizante. *Revista de Salud Ocupacional*, 41(1), 33–41.
- Bolognesi, C., & Hayashi, M. (2011). Micronucleus assay in aquatic animals. *Mutagenesis*, 26(1), 205–213. <https://doi.org/10.1093/mutage/geq073>
- Espinosa-Reyes, G., Meza-Figueroa, D., García-Sánchez, R., & Romero, F. M. (2020). Genotoxic effects of heavy metals in aquatic organisms exposed to industrial effluents. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(3), 3245–3254. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06925-9>
- Fenech, M. (2000). The in vitro micronucleus technique. *Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis*, 455(1-2), 81–95. [https://doi.org/10.1016/S0027-5107\(00\)00065-8](https://doi.org/10.1016/S0027-5107(00)00065-8)
- Fenech, M. (2007). Cytokinesis-block micronucleus cytome assay. *Nature Protocols*, 2(5), 1084–1104. <https://doi.org/10.1038/nprot.2007.77>
- López-González, M., Torres-López, R., & Andrade-Canto, F. (2019). Genotoxicity in fish exposed to contaminated aquatic environments: A review. *Ecotoxicology*

and *Environmental Safety*, 173, 276–285.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.01.080>

Martínez-Alvarado, A., García-Hernández, M., & Ramos-Galván, R. (2018). Evaluación de daño genético en trabajadores expuestos a metales pesados en una planta de flotación. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 34(2), 215–222. <https://doi.org/10.20937/RICA.2018.34.02.08>

OECD. (2014). *Test No. 487: In Vitro Mammalian Cell Micronucleus Test*. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/9789264224434-en>

Ramos Martínez, E., & Rosales Rimache, F. (2018). Evaluación del daño genético en moluscos expuestos a ambientes contaminados con metales pesados. *Revista de Toxicología Ambiental*, 17(1), 45–53.

Rivera-Hernández, B., Díaz-Ortega, L. A., & Zárate-Villafranco, L. (2021). Genotoxicidad en peces expuestos a ríos contaminados por minería artesanal. *Interciencia*, 46(2), 115–121.

Sierra-Santoyo, A., De León-Rodríguez, F., & Hernández-Rodríguez, G. (2015). Biomarcadores de daño genético y estrés oxidativo en humanos expuestos a contaminantes ambientales. *Salud Pública de México*, 57(4), 295–302. <https://doi.org/10.21149/spm.v57i4.7432>.

Torres-Bugarín O, Zavala-Cerna MG, Nava A, Flores García A, Ramos-Ibarra ML. Potential uses, limitations, and basic procedures of micronuclei and nuclear abnormalities in buccal cells. *Dis Markers*. 2014; 2014: 956835.

Torres-López, R., López-González, M., & González-Castro, A. (2020). Evaluación del daño genético en trabajadores de la industria petroquímica expuestos a solventes. *Revista de Salud Ambiental*, 20(3), 231–240.