



Abanico Veterinario. Enero-Diciembre 2025; 16:1-18. <http://dx.doi.org/10.21929/abavet2025.7>

Revisión de Literatura. Recibido: 13/10/2023. Aceptado: 17/06/2025. Publicado: 11/09/2025. Clave: e2023-44.

<https://www.youtube.com/watch?v=V3Bj91NIJw8>

Actualización de la prueba de eritrocitos micronucleados: fundamentos, significado biológico y modelos



Update on the micronucleated erythrocyte test: foundations, biological
significance, and models

**Torres-Bugarín Olivia^{*1,2} , Cervantes-González Erika¹ , Rivera-Padilla Rafael¹ ,
Montero-de-Anda José¹ , Tamayo-Garza Mónica¹ , Arellano-García Evarista² **

¹Universidad Autónoma de Guadalajara, Laboratorio de Evaluación de Genotóxicos, Unidad Académica de Ciencias de la Salud. México. ²Universidad Autónoma de Baja California, Laboratorio de Genotoxicología Ambiental, Facultad de Ciencias, México. *Autor Responsable: Olivia Torres-Bugarín. *Autor para correspondencia: Olivia Torres-Bugarín; Laboratorio de Evaluación de Genotóxicos, Medicina Interna II, Facultad de Medicina, Unidad Académica de Ciencias de la Salud, Universidad Autónoma de Guadalajara, Av. Patria 1201. Lomas del Valle, CP 45129, Zapopan, Jalisco, México. Apartado Postal 1440. E-mail: olivatorres@hotmail.com, erikacervantes_g@hotmail.com, rafael.rivera@edu.uag.mx, josem.montero@edu.uag.mx, monitamayog@gmail.com, evarista.arellano@uabc.edu.mx

RESUMEN

El daño al DNA es una amenaza para los organismos y en última instancia, para la supervivencia de las especies. Entonces, es esencial disponer de herramientas para evaluar precisa y oportunamente este daño. Una opción muy efectiva es la prueba de eritrocitos micronucleados (EMN). Por ello se realizó una actualización que incluye sus fundamentos, ventajas, limitaciones, significado de la inestabilidad genética, los modelos más comunes, así como los desarrollados en México, que destacan por su carácter innovador. Esta prueba se distingue por su alta informatividad, precisión, relativa simplicidad y costo comparativamente bajo, además que solo se requiere de tomar unas gotas de sangre, sin comprometer la vida del organismo. Un micronúcleo es una pequeña estructura citoplasmática, con membrana inestable, resultado de daño al DNA y promotor de inestabilidad y caos genético; con ello el cáncer y otras patologías. Por otro lado, si el DNA del micronúcleo se libera al citosol, inicia la respuesta inflamatoria crónica, senescencia y apoptosis. Actualmente, se cuenta de amplia variedad de modelos para entornos de laboratorio y campo, que permiten la detección y evaluación de agentes micronucleogénicos que ingresan al organismo a través de diversas vías, como oral, intraperitoneal, tópica o transplacentaria, entre otras.

Palabras clave: micronúcleos, eritrocitos, sangre periférica, genotoxicidad, citotoxicidad, inestabilidad genómica.

ABSTRACT

Damage to DNA is a threat to organisms and, ultimately, to the survival of species. Therefore, it is essential to have tools for accurately and timely assessing this damage. One very effective option is the micronucleus test (MNT). An update has been conducted, which includes its foundations, advantages, limitations, the significance of genetic instability, the most common models, as well as those developed in Mexico, known for their innovative character. This test stands out for its high informativeness, precision, relative simplicity, and comparatively low cost. Additionally, it only requires a few drops of blood, without compromising the life



of the organism. A micronucleus is a small cytoplasmic structure with an unstable membrane, resulting from DNA damage and promoting genetic instability and chaos. This can lead to conditions such as cancer and other pathologies. On the other hand, if the DNA from the micronucleus is released into the cytosol, it initiates a chronic inflammatory response, senescence, and apoptosis. Currently, a wide variety of models are available for laboratory and field environments, allowing for the detection and evaluation of micronucleogenic agents that enter the organism through various routes, such as oral, intraperitoneal, topical, or transplacental, among others.

Keywords: micronuclei, erythrocytes, peripheral blood, genotoxicity, cytotoxicity, genomic instability.

INTRODUCCIÓN

Un problema global es la liberación al medio ambiente de amplia variedad de agentes con múltiples efectos para la salud, entre ellas el compromiso de la integridad genética, daño silencioso y cuando se detecta suele ser irreversible, ya que está implicado en procesos reproductivos, degenerativos y cancerígenos (Torres-Bugarín *et al.*, 2019). Por ello, es apremiante contar con programas de biomonitorio y pruebas eficientes y sencillas de aplicar e interpretar. Una de ellas es la evaluación de eritrocitos micronucleados (EMN) de sangre periférica, cuyas bondades incluyen; que es altamente informativa, precisa, rápida, relativamente sencilla y comparativamente barata (Arellano-García *et al.*, 2021). Por ello, el objetivo fue realizar una actualización que incluye fundamentos, ventajas, limitaciones, significado de la inestabilidad genética, los modelos más comunes, así como los desarrollados en México, que destacan por su carácter innovador.

METODOLOGÍA

En las bases de datos PubMed y Google académico se realizó una revisión bibliográfica manual de artículos sobre las generalidades relacionadas con el uso de los eritrocitos como biomarcadores de salud-enfermedad, así como los principios, ventajas, desventajas y modelos en el uso de la prueba de EMN de sangre periférica. Se buscaron artículos tanto en inglés como en español, con fecha de publicación del 2013 al 2023 y algunos artículos clásicos anteriores mediante los términos “Micronucleated erythrocytes”, “model erythrocyte micronucleus test” and “biomonitoring erythrocytes micronucleated in Mexico”. De cada artículo se revisó título, panorama general de los resúmenes y se seleccionaron los artículos de mayor interés.

¿Qué es toxicidad, citotoxicidad, genotoxicidad y teratogenicidad?

La *toxicidad* es la exposición a un agente —tóxico— con capacidad de alterar la función celular, seguido de la distribución, metabolismo y la interacción de este agente o sus metabolitos con las macromoléculas como proteínas o DNA, con efectos adversos. Paracelso mencionó que cualquier sustancia puede ser tóxica (*Dosis facit venenum*), dependiendo de la dosis (Giannuzzi, 2018).



Por su parte, la *citotoxicidad* es la capacidad que tiene un agente para causar disfunción o muerte celular por apoptosis o necrosis, por tanto, poder evaluarlo es vital ([Çelik et al., 2018](#)).

Por otra parte, Ehrenberg, en 1973, acuñó el término *genotóxico* para señalar aquellos agentes que dañan al DNA tanto de células germinales como somáticas y que podría ser letal o hereditario. En cuyo caso las consecuencias son muy distintas; en células somáticas, afecta a un individuo y en germinales afecta a individuos de próximas generaciones, lo que podría amenazar la supervivencia de la especie ([Klaassen et al., 2018](#)). Estos también pueden actuar directa o indirectamente; la directa induce aberraciones cromosómicas, roturas de cadena simple o doble, entrecruzamiento, mutaciones puntuales, entre otras y la indirecta afecta proteínas histónicas, enzimas, o defectos en sistemas de reparación y replicación ([Puerta-Ortíz et al., 2020](#)).

Y pueden ser mutagénicos, cancerígenos o teratogénicos, de tal manera que un *mutágeno* induce o incrementa la frecuencia de mutaciones espontáneas—cambios permanentes y heredables del DNA. Por tanto, todos los mutágenos son genotóxicos, pero no necesariamente citotóxicos o cancerígenos.

Por otra parte, un *cancerígeno* o carcinógeno es un agente que podría incrementar la frecuencia de cáncer o inducirlo. No obstante, no todos los genotóxicos o mutágenos son cancerígenos, pero todos los cancerígenos son genotóxicos ([Torres-Bugarín et al., 2019, 2023](#)).

Los *teratógenos* tienen la capacidad de impulsar o ampliar la incidencia de fallas innatas en el crecimiento, migración y diferenciación en organismos expuestos durante la organogénesis ([Giannuzzi, 2018; Calzadilla et al., 2022](#)).

Trascendencia de la inestabilidad genómica

La inestabilidad genética es la incapacidad celular para mantener la homeostasis de los procesos de duplicación, reparación y muerte, generado por el aumento de mutaciones, procesos que estudia la genética toxicológica. Esta multidisciplina investiga el daño al DNA, la interacción de agentes físicos, químicos o biológicos con el material genético, los mecanismos de respuesta, sus consecuencias, así como el desarrollo de técnicas para estudiar todos estos agentes y sus mecanismos ([Ladeira & Smajdova, 2017](#)). Es evidente que la estabilidad del genoma es crucial para mantener el equilibrio celular y garantizar la continuidad de las especies, sin embargo, el DNA, es una molécula dinámica que continuamente sufre cambios transitorios o permanentes “mutaciones”, que podrían alterar la expresión genética y en consecuencia repercutir en la salud de los organismos ([Torres-Bugarín et al., 2019, 2023](#)). Estos cambios ocurren continuamente por causas endógenas o por factores exógenos, no obstante, estas modificaciones, podrían ser incompatibles con la vida, y es gracias a los mecanismos de detección, reparación o eliminación, que estos daños son corregidos casi en su totalidad, por ello, la tasa de mutación espontánea es baja



(Pedrazzini *et al.*, 2022); pero, al alterarse estos procesos, entonces ocurren elevada tasa de alteraciones en el material hereditario, denominado “Inestabilidad genómica”; característica del envejecimiento y de enfermedades crónico-degenerativas como el cáncer (Aguilera *et al.*, 2013). Entonces la inestabilidad genómica deriva de errores en la replicación y reparación del DNA, y de alteraciones en el control de la segregación cromosómica, que conlleva alta tasa de mutaciones. Además de estos errores intrínsecos, hay muchos agentes exógenos que incrementan las mutaciones, lo cual satura a los sistemas de reparación, e impactan como genotóxicos, mutagénicos, carcinógenos o teratógenos (Maruri *et al.*, 2022).

Tabla 1. Algunas técnicas para evaluar genotoxicidad e inestabilidad genómica

Prueba	Características	Ref.
Ames	Se usa <i>Salmonella typhimurium</i> deficiente en la síntesis de histidina, después se cuantifican las revertantes His ⁺ inducidos por el tratamiento.	Human <i>et al.</i> , (2014)
Índice mitótico	Se calcula la proporción de células en cualquier fase de la mitosis dentro de la población celular analizada.	Olivares <i>et al.</i> , (2015)
ICH	El Intercambio de Cromátidas hermanas (ICH) refleja mediante la incorporación de Brd la inestabilidad genómica (más de 5 intercambios).	Valbuena <i>et al.</i> , (2020)
Cariotipo *Clásico ♦Espectral-SKY	Patrón y características cromosómicas de una especie *Se estudia anomalías numéricas y estructurales. ♦ Se usan sondas marcadas con fluorocromos para cada cromosoma, para identificar regiones específicas.	Ortega <i>et al.</i> , (2018)
Prueba cometa	Mide la frecuencia de ruptura del DNA de cadena simple y doble, sin inducir división celular. Se diferencian los núcleos sanos de los dañados por que en estos se observa migración del DNA fracturado.	Yamunaque <i>et al.</i> , (2019)
Hibridación fluorescente in situ (FISH)	Marcaje de cromosomas mediante sondas marcadas con fluorocromos de colores específicos. Detecta secuencias DNA específicas.	Roncancio-Velandia <i>et al.</i> , (2019).
Apoptosis	Cuantifica los eventos asociados a la apoptosis, incluso la activación de caspasas, la exposición de fosfatidilserina o la fragmentación del DNA.	Pineda <i>et al.</i> , (2021)
Micronúcleos	Cuerpos citoplasmáticos esféricos que contienen fragmentos o cromosomas completos. Revela daño por clastógenos o aneuploidógenos, promotores de la inestabilidad genética.	Sommer <i>et al.</i> , (2020).

Algunas pruebas para evaluar daño celular

El dilema es identificar a tiempo a los organismos susceptibles al daño genómico y por tanto propensos a problemas crónico-degenerativos como los oncológicos, o envejecimiento prematuro; entonces es apremiante contar con biomarcadores y pruebas de fácil ejecución y relativamente económicos que los permitan identificar (Torres-Bugarín *et al.*, 2023). Como, por ejemplo, las pruebas microbiológicas —Ames— o citogenéticas —inicie mitótico, intercambio de cromátides hermanas (ICH), cariotipo, cometa, FISH, apoptosis y micronúcleos— (Tabla 1). También las hay moleculares estas detectan alteraciones pequeñas que no son detectables con microscopio, como la



reacción en cadena de la polimerasa (PCR), sondas, secuenciación, polimorfismos, y muchas más ([Merchán et al., 2017](#)).

Eritrocitos como biomarcadores de salud-enfermedad

Tradicionalmente las alteraciones hematológicas se utilizan como biomarcadores de diversas patologías y de toxicidad. Por su parte, muchas sustancias causan daño a las líneas celulares hematológicas, tanto en su función, morfología como en los procesos hematopoyéticos, citoesqueleto, metabolismo y permeabilidad, entre otros ([Frag et al., 2018](#)). Específicamente, los eritrocitos (glóbulos rojos o hematíes) transportan el oxígeno y por sus peculiaridades son una herramienta muy valiosa en el biomonitoreo y desarrollo de bioensayos ([Harabawy et al., 2014](#)). Son las células más abundantes en sangre periférica y la base de métodos para el monitoreo poco invasivo en comparación con otros tejidos o fluidos biológicos, además de que son fáciles de obtener, aislar y manipular ([Stevenson et al., 2017](#)). En mamíferos, los hematíes carecen de sistema de endomembranas, característica que facilita la determinación de la hemólisis mediante la cuantificación de hemoglobina libre por fotometría, esto detecta cambios membranales plasmáticos tanto morfológicos, (elasticidad, flexibilidad y deformabilidad, osmolaridad), como fisiológicos (envejecimiento, enfermedad o por exposición a xenobióticos) ([Frag et al., 2018](#)). Por otro lado, la vida media de los hematíes es de 120 días, esto posibilita el registro del historial de exposición pues en ese tiempo se pueden acumular diversos compuestos o modificar su morfología ([Heitland & Köster, 2021](#)). En muchas especies es posible diferenciar los eritrocitos maduros o normocromáticos en contraste con los inmaduros o reticulocitos —policromáticos (EPC)—. Estos últimos tienen máximo 24 h de haber salido a circulación, característica que permite distinguir entre efectos a corto o largo plazo ([Torres-Bugarín et al., 2019](#)). Además, los eritrocitos acumulan metales pesados u otros tóxicos en concentraciones más altas que las citoplasmáticas ([Guirola et al., 2019](#)), por ello se puede determinar la bioacumulación de sustancias químicas. Son excelentes biomarcadores de estrés oxidativo, son particularmente sensibles a la peroxidación, y los cambios en la integridad de la membrana y la actividad de las enzimas antioxidantes indican estrés oxidativo ([Stevenson et al., 2017](#)). En toxicología, es frecuente la evaluación *in vitro* e *in vivo* del efecto citotóxico y genotóxico de diferentes moléculas mediante la cuantificación de apoptosis (eritosis) y micronúcleos ([Frag et al., 2018](#)).

Micronúcleos: características, mecanismos y significado biológico

El uso de la prueba de micronúcleos es frecuente ([Hayashi, 2016](#)), no obstante, no se comprende totalmente los mecanismos de formación y eliminación de estas estructuras ([Russo & Degraffi, 2018](#)). Su forma es redonda o almendrada cuyo diámetro varía desde 1/20 a un 1/5 (0.4 a 1.6 μ) del tamaño normal del eritrocito (6 a 8 μ de diámetro). Estos



cuerpos se localizan en el citoplasma y contienen DNA, sin conexión con el núcleo, de ahí el término de micronúcleo. Generalmente se forman durante la transición metafase-anafase a partir de fragmentos (evento clastógenos) o cromosomas completos (mecanismo aneuploidógenos) que no logran incorporarse a los núcleos de las células hijas y cuya membrana es inestable y propensa a desintegrarse sin oportunidad a ser reparada (Sommer *et al.*, 2020). El DNA contenido en estas estructuras puede condensarse, replicarse y dividirse; no obstante, de manera asincrónica al material genético nuclear, incluso puede sufrir de cromotripsis, que consiste en el reordenamiento cromosómico en el que múltiples regiones cambian simultáneamente y reincorporarse al núcleo, lo cual provoca inestabilidad y caos genético y con ello cáncer o autofagia (Terradas *et al.*, 2016). Por otro lado, si el DNA del micronúcleo es liberado al citosol, desencadena la respuesta inflamatoria crónica, senescencia y apoptosis (Guo *et al.*, 2019; Torres-Bugarín *et al.*, 2023). Los micronúcleos son raros en las células de individuos sanos, pero frecuentes en células de organismos con alguna patología o envejecidas (Arellano-García *et al.*, 2020). Por todo ello son empleados como biomarcadores de efecto, exposición y susceptibilidad a daños genéticos ya que permiten identificar a organismos altamente susceptibles a daño citogenético (Sommer *et al.*, 2020).

La prueba de micronúcleos es altamente versátil, se utiliza de forma rutinaria *in vitro* e *in vivo*, en campo o laboratorio; para detectar inestabilidad genómica y la exposición a genotóxicos, mutagénicos, cancerígenos y teratogénicos. Para su estudio se cuenta con múltiples aplicaciones en amplia gama de tejidos, organismos y modelos (Torres-Bugarín *et al.*, 2023). El conteo de estas estructuras es relativamente fácil en cualquier tejido que se divida tanto en plantas (Casillas-Figueroa *et al.*, 2020) como animales (Schmid, 1975; Tabla 1), e incluso en el hombre (Batista-González *et al.*, 2006; Stopper *et al.*, 2020). Algunos de los tejidos más utilizados con éxito son células de mucosa bucal (Malacarne *et al.*, 2022), médula ósea (Schmid, 1975), y la más utilizada sangre periférica, en la que es posible utilizar linfocitos (en cultivo) (Ruíz-Ruíz *et al.*, 2023) y eritrocitos (Zúñiga-González *et al.*, 2003). Sin embargo, esta prueba tiene limitantes a considerar, como el hecho de que no detecta agentes que provocan translocaciones o inversiones, tampoco es posible utilizar células con baja frecuencia de división celular (Schmid, 1975; Hayashi, 2016).

Prueba de micronúcleos en eritrocitos de sangre periférica

Los eritrocitos de los vertebrados no mamíferos como aves, peces y anfibios son nucleados en contraste con los de los mamíferos los cuales carecen de núcleo (Figura 1), por ello se utilizan para evaluar citotoxicidad y genotoxicidad mediante pruebas como cometa, fragmentación del DNA y micronúcleos. Incluso las anomalías de la morfología celular y nuclear eritrocitaria de estas especies son indicadores de daño y suelen

clasificarse en dos categorías principales: la primera evalúa daño al DNA, mediante las anomalías nucleares que incluyen binucleados, lóbulos, muescas, yemas o vacuolas (Farag *et al.*, 2018; Zamora *et al.*, 2023). La segunda evalúa citotoxicidad, mediante anomalías morfológicas como tamaño (macrocitosis o microcitosis) y forma (esquistocitos, acantocitos, equinocitos) o citoplasmáticas (vacuolado o muescas) (Farag *et al.*, 2018). Si bien, los hematíes de mamíferos son anucleados, en ellos también es posible evaluar en eritrocitos policromáticos (EPC) genotoxicidad y citotoxicidad (mielosupresión) a 24 a 48 horas y en eritrocitos normocromáticos (ENC) exposición crónica. No obstante, dependiendo de la especie se debe considerar la histología del bazo, ya que un bazo con histología sinusal elimina los EMN de sangre periférica casi al 100%, como sucede en el humano; en contraste, el bazo no sinusal no es tan eficiente en retirar EMN, por ello en sangre periférica se pueden observar altas frecuencias de EMN espontáneos, como en el ratón. También se debe considerar que en algunos organismos en etapas juveniles el bazo aún no madura, por ello es que la frecuencia de EMN es mayor, esta característica se modifica conforme el organismo madura y se hace más eficiente impidiendo la visualización de los EMN en la etapa adulta (Zúñiga-González *et al.*, 1996; Torres-Bugarín *et al.*, 2019).

La prueba de EMN en sangre periférica es relativamente sencilla, solo requiere de unas gotas de sangre, hacer dos frotis (uno de trabajo y otro de respaldo), fijar, teñir y analizar bajo el microscopio (Torres-Bugarín *et al.*, 2019; Arellano-García *et al.*, 2021).

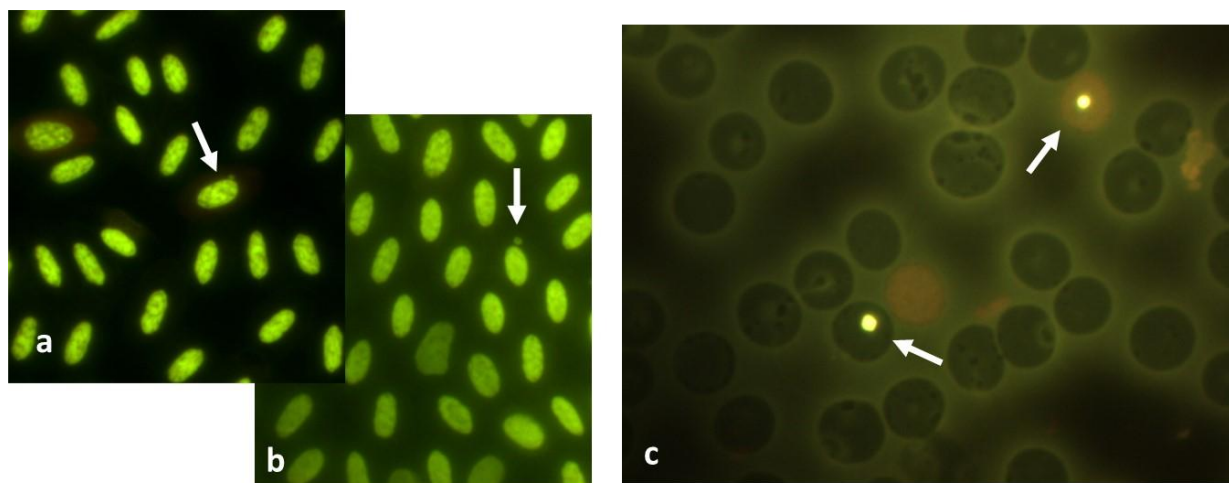


Figura 1. Eritrocitos de sangre periférica. a) Ave (*Anas acuta*), b) Pez (*Xenotoca variata*), c) Mamífero (*Mus musculus*). Flecha blanca: micronúcleo—cuerpo de Howell-Jolly; Eritrocitos Color rojo: policromático reticulocito. Tinción: acridina naranja, Amplificación óptica: 100x, Microscopio: Carl Zeiss IVFL Axiostar Plus, Filtro: fluorescencia de 450-490 nm. Imágenes Dra. Olivia Torres-Bugarín.



Modelos y aplicaciones

Existen diversos modelos que pueden emplearse en condiciones de laboratorio, ambientales o cautiverio (Tabla 2), los que permiten evaluar el impacto de un medioambiente en riesgo o de agentes potencialmente tóxicos que podrían ingresar al organismo por diferentes vías (oral, intramuscular, intraperitoneal o cutánea).

Evaluación de agentes cuya exposición es por vía oral, intramuscular o intraperitoneal: en un entorno de laboratorio, lo ideal es contar con dos grupos de organismos, uno expuesto al agente a estudiar y otro como control expuesto a agua. Se aconseja tomar una muestra (unas gotas) de sangre a todos los organismos a las 0 horas (previo a cualquier tratamiento) y cada 24 horas por el tiempo que se establezca. La obtención de sangre periférica normalmente es la punta de la cola (en organismos de laboratorio) o de alguna extremidad, evitar hacer daño innecesario, hacer dos frotis (uno de trabajo y otro de respaldo). Las muestras se fijan (etanol 80%), se tiñen (Giemsa o anaranjado de acridina) y se analizan bajo el microscopio (100x); se contabilizan 10,000 eritrocitos totales, se identifican los EPC (citotoxicidad), EPCMN (genotoxicidad a 24-48 horas — efecto agudo—) y EMN (genotoxicidad a 24- o más horas — efecto crónico —) ([Arellano-García et al., 2021](#)).

Evaluación de exposición por vía tópica: es posible determinar si los agentes penetran hasta médula ósea, para ello se utilizan ratones rasurados de una pequeña zona o eutímicos, en cuyo caso se facilita el ensayo. Se aplican los compuestos en una pequeña zona y a las 24 a 120 horas posteriores se toman unas gotas de sangre, se hacen los frotis y se analiza bajo el microscopio, si hay incremento de la frecuencia de EMN y EPCMN, entonces se establece que compuesto si penetró a médula ósea ([Naranjo-Vázquez et al., 2020](#); [Zúñiga-González et al., 2015](#)).

Evaluación de teratogenicidad: estos modelos facilitan evaluar si los compuestos evaluados cruzan barrera placentaria y alcanzan al embrión, el cual se verá reflejado mediante el incremento de EMN y EPCMN. Para minimizar la toxicidad en los fetos, se deben tratar a las hembras preñadas al finalizar la organogénesis. La unidad de estudio es una hembra por dosis, la que es tratada diariamente durante seis días consecutivos. Inmediatamente después del nacimiento, de seis organismos se extrae una gota de sangre de la cola y se realizan los frotis para luego analizarlos ([Gómez-Meda et al., 2016](#)).

Biomonitoreo ambiental: primero se debe de validar bajo condiciones de laboratorio al organismo que se pretende utilizar en el biomonitoreo, hay que considerar la historia de vida de la especie, su objetivo, el potencial como bioindicador, debe ser representativo del ecosistema, de fácil acceso y capaz de proporcionar información relevante sobre el medio ambiente. También deben tomarse en cuenta las características físicas y biológicas de los sitios de muestreo, como su naturaleza terrestre, acuática, aérea, así como las particularidades de los agentes involucrados. Con base en estas características, se utilizan los modelos descritos en la Tabla 2, como es caso del cocodrilo (*Cocodrilo*



moriletti), perico atolero (*Aratinga canicularis*), a todos los felinos en especial al gato doméstico (*Felis domesticus*) algunos peces y anfibios (Benvindo-Souza *et al.*, 2020).

Por lo tanto, para que un organismo pueda ser considerado un buen modelo en la evaluación de genotóxicos bajo condiciones de laboratorio o ambientales mediante la prueba de micronúcleos (EMN) en sangre periférica, deben tomarse en cuenta los siguientes aspectos (Arellano-García *et al.*, 2021):

- El organismo este fuera de riesgo y sea de fácil manejo y manutención.
- Qué tenga eritropoyesis muy activa y bazo no sinosal (este se identifica si espontáneamente se contabilizan mínimo 4-6 EMN/10,000 eritrocitos).
- Que el núcleo, en caso de tenerlo, sea regular y sin lóbulos y la relación citoplasma-núcleo sea amplio para identificar claramente los micronúcleos y es ideal que posean EPC en sangre periférica.
- Además, al ser expuesto a un genotóxico conocido en condiciones de laboratorio, el organismo debe mostrar la formación significativa de EMN, como respuesta al compuesto.

Tabla 2. Algunos modelos utilizados en México en la aplicación de la prueba de micronúcleos en eritrocitos de sangre periférica (EMN)

Modelos		Características	Respuesta Frecuencia de EMN/10, 000 ET			Ref.
			Exposición	Basal	Expuesto	
Primates	Humano <i>Homo sapiens</i>	Adulto Sin bazo	Quimioterapia	29.5 ± 5.8	65.2 ± 17.7	Zúñiga-González <i>et al.</i> , (1996)
		Neonato Patología materna	Diabetes gestacional	3.5 ± 4.1	7.7 ± 4.8	Batista-González <i>et al.</i> , (2006)
	<i>Marmoceta Callithrix jacchus</i>	Cautiverio	Agua bidestilada Ara-C (3mg/kg/0h) + Citarabina (24h/IM)	6:0 ± 3.0	26.4 ± 8.6	Zuñiga <i>et al.</i> , (2005)
Carnívoros	Gato <i>Felis domesticus</i>	Cautiverio	- Agua - Colchicina (0.19mg/kg) + Ara-C (4.5 mg/kg) *	2.2 ± 0.9	3.1 ± 1.4	Torres-Bugarín <i>et al.</i> , (2019)
		Gato doméstico	Cáncer, albinismo, polidactilia	2.3 ± 1.1	8.6	Arellano-García <i>et al.</i> , (2020)
Ungulados	Becerras Holstein Friesian	6- 9 meses	Vacunas recombinantes	7.4 ± 1.0	1.3 ± 0.2	Ramos-Ibarra <i>et al.</i> , (2020)
Roedores	Ratón C57BL/6JNHsd Machos	◊ AgNPs-PVP	Agua destilada AgNPs-PVP (12mg/ kg)	12	8	Valenzuela <i>et al.</i> , (2019)
	Ratón BALB/c	Citoprotector	Agua	13.4 ± 7.2	16.4 ± 7.4	Franco-Ramos <i>et al.</i> , (2020)
		<i>Nigella sativa</i> -Aceite, IP	<i>Nigella sativa</i>	14.4 ± 4.5	15.6 ± 6.0	
		EMN: 0h-72 h	Cisplatino	11.8 ± 7.5	10 ± 4.8	
			<i>N. sativa</i> + Cisplatino	14.2 ± 8.9	24 ± 10.2	
Ratón SKH1-sin pelo	Eutímico e inmunocompetente	Minoxidil Tópico/5%/12h/10 días	1.7 Aprox.	2.5 Aprox.	Naranjo <i>et al.</i> , (2020).	



	Rata sin pelo	Transplacentario Hembras expuestas EMN: Recién nacidos	UVA- 365 nm /160 min Gestación (16–21 días)	4.0 ± 0.6	8.9 ± 1.9	Zúñiga-González <i>et al.</i> , (2015)
	Rata	Lactancia materna EMN-Recién nacidos	Colchicina 20mg/kg/24h/3 días	2.7 ± 0.8 0h	5.0 ± 1.5 120 h	Gómez-Meda <i>et al.</i> , (2016)
Mamíferos Acuáticos	Delfín <i>Tursiops truncatus</i>	Cautiverio	Delfinarios	18.6±3.5	26.0 ± 5.9	Zamora <i>et al.</i> , (2006)
Mamíferos Voladores	Murciélago <i>Pteronotus mexicanus</i>	♂ EA: Jalisco-Colima	Exp. Agroquímicos El salitre (1) Don Pancho (2)	0.06 ± 0.04 Bajo nivel (1)	0.1 ± 0.06 Alto nivel (2)	Sandoval-Herrera <i>et al.</i> , (2020)
Logomorfos	Conejo <i>Oryctolagus cuniculus</i>	Transplacentario Hembras/18 meses EMN: Recién nacidos	Ciclofosfamida /IM 4 mg/kg/24h/6 días 25-30 días7gestación	18.0 ± 8.1	59.0 ± 23.4	Gómez-Meda <i>et al.</i> , (2008)
Aves	Charrán real <i>Thalasseus maximus</i>	♂ EA	Etapas: Desarrollo embrionario	8.5 Aprox. Inicial	1.0 Aprox. Avanzada	Ceyca-Contreras <i>et al.</i> , (2023)
	Gorrión <i>Centronyx bairdii</i>	♂ EA: Durango	Pastizales	2.55 ±3.3	—	Pereda-Solis <i>et al.</i> , (2021)
Reptiles	Cocodrilo <i>moriletti</i>	Cautiverio	Ciclofosfamida 7 mg/kg/2 días	3.4 ± 2.6 0h	12.0 ± 8.3 72 h	Zamora <i>et al.</i> , (2023)
	Tortuga <i>Chelonia mydas</i>	♂ EA	Caribe Mexicano	0.0001		Labrada- Martagón <i>et al.</i> , (2019)
Peces	Tilapia sp. cf. Zillii	♂ EA	Hardy River (basal) Xochimilco Lagoon Arsénico y selenio	2 ±1.4	7.4 ± 5.7	Flores-Galván <i>et al.</i> , (2020).
	<i>Cyprinus carpio</i>	Cultivo	Metales pesados Al + Fe + Hg	0.5 0h	7.5 12h	Gómez <i>et al.</i> , (2017).
	<i>Xenotoca melanosoma</i>	Cautiverio	Ciclofosfamida 50 mg/L	2.9 ± 2.1	11.4 ± 3.4	Torres-Bugarín <i>et al.</i> , (2019).

h- horas; IM-Intramuscular; ◇- AgNPs-Nanopartículas de plata con polivinilpirrolidone; ♂-Evaluación ambiental.

CONCLUSIÓN

Es imperativo disponer de técnicas o biomarcadores que puedan proporcionar información precisa y oportuna sobre el daño genotóxico que experimentan diferentes especies expuestas de manera aguda o crónica a agentes nocivos. Los métodos utilizados para evaluar los riesgos o la protección frente a efectos genotóxicos a menudo resultan ser costosos, complicados o invasivos, en algunos casos requieren incluso el sacrificio del organismo en estudio. En este contexto, la prueba de EMN de sangre periférica se constituye como una excelente alternativa en el monitoreo del daño genético en poblaciones en alto riesgo. Esta técnica se destaca por su claridad y precisión, y no requiere el uso de cultivos celulares. Es altamente fiable, eficaz, rápida y sencilla, además de ser relativamente económica. Mediante la aplicación de esta técnica, es posible obtener resultados en un corto período de tiempo sin necesidad de instalaciones especializadas. Además, su versatilidad permite su aplicación en diversos organismos,



tejidos y modelos de estudio. Un beneficio adicional es que, cuando se aplica en sangre periférica, esta prueba resulta mínimamente invasiva.

AGRADECIMIENTOS

A CONAHCYT - Programa Estancia posdoctoral por México 2023, Modalidad Académica (CVU-109104). A la Universidad Autónoma de Baja California (UABC) y a la Universidad Autónoma de Guadalajara (UAG) por todas las facilidades y el apoyo recibido para la estancia posdoctoral.

LITERATURA CITADA

AGUILERA A, García-Muse T. 2013. Causes of genome instability. *Annual Review of Genetics*. 47:19–50. ISSN: 0066-4197. <https://doi.org/10.1146/annurev-genet-111212-133232>

ANGARITA MM, Torres CM, Díaz TA. 2017. Técnicas de biología molecular en el desarrollo de la investigación. Revisión de la literatura. *Revista Habanera de Ciencias Médicas*. 16(5):796-807. ISSN: 1729-519X.
http://scielo.sld.cu/pdf/rhcm/v16n5/en_rhcm12517.pdf

ARELLANO-GARCÍA ME, Izaguirre-Pérez ME, Molina-Noyola LD, Castañeda-Yslas IY, Luna-Vázquez-Gómez R, Torres-Bugarín O. 2020. Polydactyl hypopigmented cat with squamous cell carcinoma—A case report. *Frontiers in Veterinary Science*. 12(7):258. ISSN: 2297-1769. <https://doi.org/10.3389/fvets.2020.00258>

ARELLANO-GARCÍA ME, Torres-Bugarín O, García-García MR, García-Flores D, Toledano-Magaña Y, Sanabria-Mora CS, Castro-Gamboa S, García-Ramos JC. 2021. Genomic instability and cyto-genotoxic damage in animal species. In: updates on veterinary anatomy and physiology. Edited Catrin Sian Rutland and Samir A.A. El-Gendy. Ed. Intech Open. 1-19. ISBN: 978-1-83969-530-8.
<https://www.intechopen.com/chapters/78242>

BATISTA-GONZÁLEZ CM, Corona-Rivera JR, Gómez-Meda BC, Zamora-Pérez AL, Ramos-Ibarra ML, Zúñiga-González GM. 2006. Micronucleated erythrocytes in preterm newborns in relation to maternal pathology. *Revista Biomédica*. 17:11-16. ISSN: 2007-8447.
<https://www.medigraphic.com/pdfs/revbio/bio-2006/bio061c.pdf>

BENVINDO-SOUZA M, Santos OE, Assis RA, Araújo SC, Borges RE, de Melo D, Souza SL. 2020. Micronucleus test in tadpole erythrocytes: Trends in studies and new paths. *Chemosphere*. 240:124910. ISSN: 0045-6535.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124910>



CALZADILLA LS, Uriarte NA, Ricardo SF, Melian SC. 2022. Consideraciones actuales sobre los teratógenos y sus efectos durante el embarazo. *MEDISAN*. 26(2): 381-402. ISSN: 1029-3019. <http://scielo.sld.cu/pdf/san/v26n2/1029-3019-san-26-02-381.pdf>

CASILLAS-FIGUEROA F, Arellano-García ME, Leyva-Aguilera C, Ruíz-Ruiz B, Luna Vázquez-Gómez R, Radilla-Chávez P, Chávez-Santoscoy RA, Pestryakov A, Toledano-Magaña Y, García-Ramos JC. 2020. Argovit™ silver nanoparticles effects on allium cepa: plant growth promotion without cyto genotoxic damage. *Nanomaterials*. 10(7):1386. ISSN: 2079-4991. <https://doi.org/10.3390/nano10071386>

ÇELİK, TA. 2018. Introductory chapter: cytotoxicity. Pp 3-6. Ed. In TechOpen. 978-1-78923-431-2. ISBN: 78-1-83881-443-4. <https://www.intechopen.com/chapters/61438>

CEYCA-CONTRERAS JP, Castillo-Guerrero JA, Torres-Bugarín O, García-Hernández J, Betancourt-Lozano M. 2023. Micronuclei in embryos of eight seabird species in northwestern Mexico: a biomarker of exposure to coastal pollution?. *Mutation Research Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*. (887):503615. ISSN: 1879-3592. <https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2023.503615>

FARAG MR, Alagawany M. 2018. Erythrocytes as a biological model for screening of xenobiotics toxicity. *Chemico-Biological Interactions*. 5:279:73-83. ISSN: 1872-7786. <https://doi.org/10.1016/j.cbi.2017.11.007>

FLORES-GALVÁN MA, Daesslé LW, Arellano-García E, Torres-Bugarín O, Macías-Zamora JV, Ruíz-Campos G. 2020. Genotoxicity in fishes environmentally exposed to As, Se, Hg, Pb, Cr and toxaphene in the lower Colorado River basin, at Mexicali valley, Baja California, México. *Ecotoxicology*. 29(4):493-502. ISSN 1573-3017. <https://doi.org/10.1007/s10646-020-02200-9>

FRANCO-RAMOS RS, López-Romero CA, Torres-Ortega H, Oseguera-Herrera D, Lamoreaux-Aguayo JP, Molina-Noyola D, Juárez-Vázquez CI, Torres-Bugarín O. 2020. Evaluation of anti-cytotoxic and anti-genotoxic effects of *Nigella sativa* through a micronucleus test in BALB/c mice. *Nutrients*. 12(5):1317. ISSN: 2072-6643. <https://doi.org/10.3390/nu12051317>

GIANUZZI L. 2018. Toxicología general y aplicada. Editorial Universidad de la Plata. Pp. 5-8. ISBN: 978-950-34-1695-2. <https://doi.org/10.35537/10915/71533>



GÓMEZ-MEDA BC, Bañales-Martínez LR, Zamora-Perez AL, Lemus-Varela ML, Trujillo X, Sánchez-Parada MG, Torres-Mendoza BM, Armendáriz-Borunda J, Zúñiga-González GM. 2016. Micronucleated erythrocytes in peripheral blood from neonate rats exposed by breastfeeding to cyclophosphamide, colchicine, or cytosine-arabinoside. *BioMed Research International*. 1-10. ISSN: 2314-6141. <https://doi.org/10.1155/2016/9161648>

GÓMEZ-MEDA, BC, Zamora-Perez, AL, Ramos-Ibarra ML, Batista-González CM, Zúñiga-González GM. 2008. Micronucleated erythrocytes in peripheral blood of newborn rabbits after exposure to cyclophosphamide during pregnancy. *Scandinavian Journal of Laboratory Animal Science*. 35(3):151-158. ISSN: 2002-0112. <https://doi.org/10.23675/sjlas.v35i3.146>

GÓMEZ-OLIVÁN LM, Mendoza-Zenil YP, SanJuan-Reyes N, Galar-Martínez M, Ramírez-Durán N, Rodríguez Martín-Doimeadios RDC, Rodríguez-Fariñas N, Islas-Flores H, Elizalde-Velázquez A, García-Medina S, Pérez-Pastén Borja R. 2017. Geno- and cytotoxicity induced on *Cyprinus carpio* by aluminum, iron, mercury and mixture thereof. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 135:98-105. ISSN: 1090-2414 <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2016.09.037>

GUIROLA FJ, Mastrapa OH, García GY, Pérez BL, Cisnero N, Batista RY. 2019. Caracterización de la intoxicación por plomo. Revisión bibliográfica. *RETEL: Revista de Toxicología en Línea*. 59: 39-63. ISSN: 1668-091X <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/lead-poisoning-and-health>

GUO X, Ni J, Liang Z, Xue J, Fenech MF, Wang X. 2019. The molecular origins and pathophysiological consequences of micronuclei: new insights into an age-old problem. *Mutation Research/Reviews in Mutation Research*. 779:1-35. ISSN: 1388-2139. <https://doi.org/10.1016/j.mrrev.2018.11.001>

HARABAWY SA, Mosleh YY. 2014. The role of vitamins A, C, E and selenium as antioxidants against genotoxicity and cytotoxicity of cadmium, copper, lead and zinc on erythrocytes of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 104:28-35. ISSN: 1090-2414. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.02.015>

HAYASHI M. 2016. The micronucleus test—most widely used *in vivo* genotoxicity test. *Genes and Environmental*. 38, e18. ISSN: 1880-7062. <https://doi.org/10.1186/s41021-016-0044-x>

HEITLAND P, Köster HD. 2021. Human biomonitoring of 73 elements in blood, serum, erythrocytes and urine. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*. 64, e126706. ISSN: 1878-3252. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33352468/>



KLAASSEN CD. 2018. Casarett & Doull's Toxicology: The Basic Science of Poisons, 9th Edition McGraw-Hill. ISBN: 978-1-259-86374-5.

<https://accesspharmacy.mhmedical.com/book.aspx?bookid=2462#194918150>

LABRADA-MARTAGÓN V, Muñoz Teneriá FA, Tania Zenteno-Savín T. 2019. Standardized micronucleus assay for peripheral blood from sea turtles. *Chelonian Conservation and Biology*. 18(2):175-186. ISSN: 1071-8443.

<https://doi.org/10.2744/CCB-1373.1>

LADEIRA C, Smajdova L. 2017. The use of genotoxicity biomarkers in molecular epidemiology: Applications in environmental, occupational and dietary studies. *AIMS Genet*. 4:166–191. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6690241/>

MALACARNE IT, Alpire MES, Malinverni ACM, Ribeiro DA 2022. The use of micronucleus assay in oral mucosa cells as a suitable biomarker in children exposed to environmental mutagens: theoretical concepts, guidelines and future directions. *Reviews on Environmental Health*. 11, e0084. ISSN: 2191-0308. <https://doi.org/10.1515/reveh-2022-0084>

MARURI J, Martínez-Cortés F, Odales J, Manoutcharian K. 2022. Inestabilidad genética, origen y evolución del cáncer y la inmunoterapia personalizada. *Vacunas*. 23(3): 222-233. ISSN: 1576-9887. <https://doi.org/10.1016/j.vacun.2022.01.004>

MERCHÁN MA, Caicedo MIT, Torres AKD. 2017. Molecular biology techniques for research development. A literature review. *Revista Habanera de Ciencias Médicas*. 16(5):796-807. ISSN: 1729-519X.

<https://www.medigraphic.com/pdfs/revhabciemed/hcm-2017/hcm175l.pdf>

NARANJO-VÁZQUEZ E, Sánchez-Parada MG, Gómez-Meda BC, Zamora-Perez AL, Gallegos-Arreola MP, González-Santiago AE, Zúñiga-González GM. 2020. Effect of high-dose topical minoxidil on erythrocyte quality in SKH1 hairless mice. *Animals*. 10(4):731. ISSN:2076-2615. <https://doi.org/10.3390/ani10040731>

OLIVARES Y, Gaete H, Neaman A. 2015. Evaluación de la fitotoxicidad y la genotoxicidad de suelos agrícolas de zonas con actividades mineras de cobre de la cuenca del río Aconcagua (Chile central). *Revista Internacional De Contaminación Ambiental*. 31(3):237-243. ISSN: 0188-4999.

<https://www.scielo.org.mx/pdf/rica/v31n3/v31n3a3.pdf>

ORTEGA TM, Torres RJ, Ángel OJ. 2018. Fundamentos de citogenética humana y animal. Editorial Universidad Nacional Abierta y a Distancia UNAD. 24, 61-65. ISBN:978-958-651-651-8. <https://doi.org/10.22490/9789586516518>



PEDRAZZINI E, Stella F, Slavutsky I. 2022. Inestabilidad genómica en mieloma múltiple. *Hematología*. 25(3):1-12. ISSN: 2250-8309.

<https://libros.unad.edu.co/index.php/selloeditorial/catalog/book/100>

PEREDA-SOLIS M, Guillén-González C, Ramírez- Carreño K, Martínez-Guerrero J, Sierra-Franco D, Salazar-Borunda M, Torres-Bugarín O. 2022. Leukocyte profile, micronuclei, and erythrocytic nuclear protrusions in sparrows (*Centronyx bairdii* and *Ammodramus savannarum*) of the chihuahuan desert during the winter. *Agrociencia*. 56:46-60. ISSN: 2521-9766.

<https://www.agrociencia-colpos.org/index.php/agrociencia/article/view/2710/2119>

PINEDA EM. 2021. Análisis de las causas de fragmentación de ADN en células procariontes y eucariontes, Tesis de Licenciatura de la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Xochimilco.14-19.

<https://repositorio.xoc.uam.mx/jspui/handle/123456789/26297>

PUERTA-ORTIZ A, Morales-Aramburo J, Efectos biológicos de las radiaciones ionizantes- 2020. *Revista Colombiana de Cardiología*. 27(1):61-71. ISSN: 0120-5633.

https://rccardiologia.com/previos/RCC%202020%20Vol.%2027/RCC_2020_27_S1/RCC_2020_27_S1_061-071.pdf

RAMOS-IBARRA ML, Villa-Castellanos J, Barba-León J, Flores-Valdez M, Zavala-Aguirre JL, Torres Bugarín O. 2020. Estudio exploratorio de la genotoxicidad de vacunas recombinantes para tuberculosis bovina. *Abanico Veterinario*. 10(1):1-14. ISSN: 2448-6132-

<https://abanicoacademico.mx/revistasabanico/index.php/abanico-veterinario/article/view/249/409>

RONCANCIO-VELANDIA T, Parra-Medina R, Mejia JC, Gevara-Pardo G. 2019. Hibridación *in situ* fluorescente (FISH) en el Instituto Nacional de Cancerología (INC) de Colombia. Experiencia de 5 años. *Revista Colombiana de Cancerología*. 23(1):3-11. ISSN: 0123-9015.

<https://doi.org/10.35509/01239015.73>

RUIZ-RUIZ B, Arellano-García ME, Radilla-Chávez P, Salas-Vargas DS, Toledano-Magaña Y, Casillas-Figueroa F, Luna Vázquez-Gómez R, Pestryakov A, García-Ramos JC, Bogdanchikova N. 2020. Cytokinesis-block micronucleus assay using human lymphocytes as a sensitive tool for cytotoxicity/genotoxicity evaluation of AgNPs. *ACS Omega*. 5(21):12005-12015. ISSN: 2079-4991.

<https://doi.org/10.1021/acsomega.0c00149>



RUSSO A, Degrassi F. 2018. Molecular cytogenetics of the micronucleus: Still surprising. *Mutation Research*. 836 (PtA):36-40. ISSN: 1879-3592.

<https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2018.05.011>

SANDOVAL-HERRERA N, Paz J, Herrera M, Welch K. 2020. Micronucleus test reveals genotoxic effects in bats associated with agricultural activity. *Environmental Toxicology and Chemistry*. 40:202–207. ISSN: 1552-8618. <https://doi.org/10.1002/etc.4907>

SCHMID W. 1975. The micronucleus test. *Mutation Research*. 31(1):9-15. ISSN: 1879-3592. [https://doi.org/10.1016/0165-1161\(75\)90058-8](https://doi.org/10.1016/0165-1161(75)90058-8)

SOMMER S, Buraczewska I, Kruszewski M. 2020. Micronucleus assay: The state of art, and future directions. *International Journal of Molecular Sciences*. 24;21(4):1534. ISSN: 1422-0067. <https://www.mdpi.com/1422-0067/21/4/1534>

STEVENSON A, Lopez D, Khoo P, Kalaria RN, Mukaetova EB. 2017. Exploring erythrocytes as blood biomarkers for Alzheimer's disease. *Journal of Alzheimer's Disease*. 60(3):845-857. ISSN: 1875-8908. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28984593/>

TERRADAS M, Martín, M, Genescà A. 2016. Impaired nuclear functions in micronuclei results in genome instability and chromothripsis. *Archives of Toxicology*. 90(11):2657–2667. ISSN: 1432-0738. <https://doi.org/10.1007/s00204-016-1818-4>

STOPPER H, Bankoglu EE, Marcos R, Pastor S. 2020. Micronucleus frequency in chronic kidney disease patients: A review. *Mutation Research - Reviews in Mutation Research*. 786, e108340. ISSN:1388-2139.

<https://doi.org/10.1016/j.mrrev.2020.108340>

TORRES-BUGARÍN O, Arias-Ruíz L. 2023. Micronúcleos: Actualización del papel en la inestabilidad genética, inflamación, envejecimiento y cáncer. *Revisión panorámica. Revista Biomédica*. 34(2):208-223. ISSN: 20078447.

<https://doi.org/10.32776/revbiomed.v34i2.1101>

TORRES-BUGARÍN O, Carillo-GC, Armijo GJ. 2019. Evaluación de genotóxicos ambientales mediante la prueba de micronúcleos en sangre periférica. En *Ecología y Salud de la fauna silvestre Avances de investigación. Colección Investigadores. UJED. Ed. 2*. ISBN: 978-607-503-223-8.

<http://cibnor.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1001/589>



TORRES-BUGARIN O, Ramos-Ibarra M, Flores-G A, Ruíz BS, Zavala-Cerna MG. 2015. La prueba de micronúcleos: Biomarcador de contaminación genotóxica, mutagénica y/o teratogénica. En Pacífico Mexicano, Contaminación e Impactos Ambientales: Diagnóstico y Tendencias. 2015.819-8-48. ISBN: 978-607-7887-94-2.

<https://cibnor.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1001/589>

TORRES-BUGARÍN O, Zavala-Cerna M, Nava-Zavala A, Flores-García A, Ramos-Ibarra M. 2014. Potential uses, limitations, and basic procedures of micronuclei and nuclear abnormalities in buccal cells. *Disease Markers*. 2014, e956835. ISSN: 1875-8630.

<https://doi.org/10.1155/2014/956835>

VALBUENA D, Meléndez FM, Villegas V, Sánchez M, Rodón LM. 2020. Daño celular y genético como determinantes de la toxicidad de los plaguicidas. *Ciencia en Desarrollo*. 11(2):25-42. ISSN: 2462-7658. <https://doi.org/10.19053/01217488.v11.n2.2020.11245>

VALENZUELA-SALAS LM, Girón-Vázquez NG, García-Ramos JC, Torres-Bugarín O, Gómez C, Pestryakov A, Villarreal-Gómez LJ, Toledano-Magaña Y, Bogdanchikova N. 2019. Antiproliferative and antitumor effect of non-genotoxic silver nanoparticles on melanoma models. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*. 1-12. ISSN: 1942-0994.

<https://doi.org/10.1155/2019/4528241>

YAMUNAUQUE CL, García BF, Serquén-LL. 2019. Ensayo cometa. *Revista Experiencia en Medicina del Hospital Regional Lambayeque*. 5(3)162-163. ISSN: 2412-4214.

<https://rem.hrlamb.gob.pe/index.php/REM/article/view/374/222>

ZAMORA-PEREZ A, Camacho-Magaña C, Gómez-Meda B, Ramos-Ibarra M, Batista-González C, Zúñiga-González G. 2006. Importance of spontaneous micronucleated erythrocytes in bottlenose dolphin (*Tursiops truncatus*) to marine toxicology studies. *Acta Biologica Hungarica*. 57(4):441-448. ISSN:0236-5383.

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/17278706/>

ZAMORA-PEREZ AL, Luna-Aguirre J, Zúñiga-González GM, Torres-Bugarín O, Torres-Mendoza BM, Gallegos-Areola MP, Ortiz-García RG, Gutiérrez-Sevilla JE, Gómez-Meda BC. 2021. Micronuclei and nuclear buds induced by cyclophosphamide in *Crocodylus moreletii* as useful biomarkers in aquatic environments. *Animals*. 11(11): 3178. ISSN: 2076-2615. <https://doi.org/10.3390/ani11113178>

ZÚÑIGA G, Torres-Bugarín O, Ramírez-Muñoz MP, Delgado-Lamas JL, De Loza-Saldaña R, Cantú JM. 1996. Micronucleated erythrocytes in splenectomized with and without chemotherapy. *Mutation Research*. 12;361(2-3):107-112. ISSN: 1879-3592.

[https://doi.org/10.1016/s0165-1161\(96\)90244-7](https://doi.org/10.1016/s0165-1161(96)90244-7)



ZÚÑIGA-GONZÁLEZ GM, Gómez-Meda BC, Zamora-Perez AL, Martínez-González MA, Muñoz de Haro IA, Pérez-Navarro AE, Armendáriz-Borunda J, Gallegos-Arreola MP. 2015. Micronucleated erythrocytes in newborns of rat dams exposed to ultraviolet-A light during pregnancy, protection by ascorbic acid supplementation. *Mutation Research/Genetic Toxicology*. 782:36-41. ISSN: 1383-5718.

<https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2015.03.013>

ZÚÑIGA-GONZÁLEZ GM, Torres-Bugarín O, Zamora-Perez AL, Gómez-Meda BC, Ramos-Ibarra ML, Gallegos-Arreola P, Flores-García A, López-Urbe A. 2003. Induction of micronucleated erythrocytes in mouse peripheral blood after cutaneous application of 5-fluorouracil. *Archives of Medical Research*. 34:141-144. ISSN: 1873-5487.

[https://doi.org/10.1016/S0188-4409\(02\)00470-8](https://doi.org/10.1016/S0188-4409(02)00470-8)

ZÚÑIGA-GONZÁLEZ GM, Gómez-Meda BC, Zamora-Perez AL, Ramos-Ibarra ML, Batista-González CM, Lemus-Varela ML, Rodríguez-Avila JL, Gallegos-Arreola MP. 2005. Micronucleated erythrocyte frequencies in old and new world primates: measurement of micronucleated erythrocyte frequencies in peripheral blood of *Callithrix jacchus* as a model for evaluating genotoxicity in primates. *Environmental and Molecular Mutagenesis*. 46(4):253-9. ISSN:1098-2280. <https://doi.org/10.1002/em.20154>

Errata Erratum

<https://abanicoacademico.mx/revistasabanico-version-nueva/index.php/abanico-veterinario/errata>