

Residuos de glifosato en cereales de desayuno de origen internacional y nacional comercializados en Saltillo, Coahuila

Glyphosate residues in breakfast cereals of national and international origin marketed in Saltillo, Coahuila

Arely Cano-García¹, Yisa María Ochoa-Fuentes²,
Augusto Gil Ceballos-Ceballos³, Ernesto Cerna-Chávez⁴

DOI: 10.19136/hs.a22n2.5489

Artículo Original

• Fecha de recibido: 6 de diciembre de 2022 • Fecha de aceptado: 23 de marzo de 2023 • Fecha de publicación: 28 de abril de 2023

Autor de correspondencia

Yisa María Ochoa Fuentes. Dirección postal: Calzada Antonio Narro 1923, Buenavista, 25315, Saltillo, Coahuila, México.
Correo electrónico: yisa8a@yahoo.com

Resumen

Objetivo: Detectar y cuantificar residuos de glifosato en cereales de desayuno comercializados en la ciudad de Saltillo, Coahuila.

Materiales y Métodos: Se analizaron tres muestras de 12 marcas de cereal distintas. Para la extracción de plaguicidas se utilizó un equipo Soxhlet y la cuantificación se realizó por medio de Cromatografía Líquida de Alta Eficiencia (HPLC), utilizando un equipo marca Agilent modelo 1100 Series acoplado a un detector UV-Vis.

Resultados: Se detectó glifosato en el 100% de las muestras analizadas, se obtuvieron concentraciones de entre 170 a 2 400 mg/kg, las muestras que presentaron mayores concentraciones fueron las de marcas internacionales.

Conclusiones: Se detectaron residuos de glifosato en las 24 muestras analizadas de cereales de desayuno, las cuales sobrepasaron los LMR establecidos en el CODEX ALIMENTARIUS, por lo que es importante realizar más estudios con el fin de monitorear y asegurar la inocuidad de los productos procesados que son consumidos.

Palabras clave: Herbicida; HPLC; Cereales; Plaguicidas; Agricultura.

Abstract

Objective: To detect and quantify glyphosate residues in breakfast cereals marketed in the city of Saltillo, Coahuila.

Materials and Methods: Two samples of 12 different cereal brands were analyzed. A Soxhlet apparatus was used for pesticide extraction and quantification was performed by High Performance Liquid Chromatography (HPLC) using an Agilent model 1100 Series equipment coupled to a UV-Vis detector.

Results: Glyphosate was detected in 100% of the samples analyzed, with concentrations ranging from 170 to 2 400 mg/kg; the samples with the highest concentrations were those of international brands.

Conclusions: All the concentrations detected in the commercial cereal samples exceeded the MRLs established in CODEX ALIMENTARIUS, so it is important to carry out more studies in order to monitor and ensure the safety of the processed products that are consumed.

Keywords: Glyphosate; HPLC; Cereals; Pesticides; Agriculture.

¹ Maestra en Ciencias en Ecología Tropical. Estudiante de Doctorado del Departamento de Parasitología Agrícola. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Coahuila, México.

² Doctora en Ciencias en Parasitología Agrícola. Profesor Investigador del Departamento de Parasitología Agrícola. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Coahuila, México.

³ Maestro en Ciencias en Parasitología Agrícola. Estudiante de Doctorado en el Departamento de Parasitología Agrícola. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Coahuila, México.

⁴ Doctor en Ciencias en Parasitología Agrícola. Profesor Investigador del Departamento de Parasitología Agrícola. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Coahuila, México.



Introducción

La producción de alimentos en el mundo es una de las actividades más importantes para el hombre, por lo que debido a la creciente demanda, se ha optado por aplicar productos químicos como los plaguicidas, con el fin de controlar plagas y enfermedades en los cultivos para asegurar una eficiente producción¹. Una de las problemáticas de importancia en la producción de alimentos es la presencia de malezas, las cuales compiten con los cultivos, provocando pérdidas de entre el 10 y 12%. Por esta razón los productores han optado por aplicar herbicidas, que resulta una práctica rápida para controlar la propagación de malezas^{2,3}. El glifosato es el herbicida más utilizado a nivel mundial tanto en volumen como en valor económico. Para el año 2020 sus ventas alcanzaron los \$7.8 billones de dólares y para el año 2027 se estima que las ventas alcancen los 11.1 billones de dólares⁴. Tan solo en el año 2019 a nivel mundial se utilizaron más de 2 millones de toneladas de herbicidas. En México se utilizaron aproximadamente 11 366 toneladas y en estados Unidos se utiliza hasta el 19% del volumen mundial. Desde el 2005 en México se han otorgado 651 permisos para sembrar cultivos genéticamente modificados, destacando el algodón, maíz, trigo y soya, de estos el 77.6% pertenecen a permisos para cultivos tolerantes al glifosato⁵.

El glifosato es un herbicida no selectivo, sistémico de acción foliar que actúa inhibiendo la biosíntesis de aminoácidos aromáticos en las plantas. Específicamente inhibe la enzima EPSPS(5-enolpirruvil-shikimato-3-fosfato-sintetasa) en la vía metabólica del shikimato, que se realiza en los cloroplastos de la célula. Este proceso es de gran importancia para las plantas ya que de él resulta la síntesis de aminoácidos. El glifosato afecta a la planta disminuyendo la fotosíntesis, degradando la clorofila e inhibiendo y oxidando la hormona reguladora auxina, que participa en el proceso de crecimiento de las plantas⁶. El glifosato se presenta como una sal de isopropilamina, amonio o sódica, así como otras sustancias que son agregadas al producto como coadyuvantes como la amina de sebo polietiloxilada (POEA) y ácido sulfúrico y fosfórico, con el fin de facilitar la absorción del glifosato por las plantas⁷. Algunos estudios mencionan que la persistencia del glifosato en el suelo es muy alta, incluso después de tres años de haber sido aplicado y aún bajo condiciones de exposición a lluvias⁸.

Actualmente existe una discrepancia y es un tema de conflicto el efecto del glifosato en la salud. La Organización Mundial de la Salud (OMS) en 2015 clasificó como probable carcinógeno para humanos al glifosato, causando daños de genotoxicidad y estrés oxidativo. Esto de acuerdo con los resultados de investigación de la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC), quien después de la revisión de muchos estudios realizados, clasificó al

glifosato como “probable carcinogénico para los humanos” debido a que existen evidencias suficientes en animales de experimentación, aunque existan evidencias limitadas en humanos^{9,10}. Sin embargo la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA) considera poco probable que el glifosato represente un peligro carcinogénico para los seres humanos, sosteniendo que no hay pruebas suficientes en humanos para clasificarlo de esta forma. El Comité de Evaluación de riesgos de la Agencia Europea de Sustancias Químicas (ECHA) concluyó también que la evidencia científica que existe no cumple con los criterios necesarios para clasificar al glifosato como carcinógeno o genotóxico¹¹.

A pesar de esta controversia, en 2020 se publicó la antología toxicológica del glifosato, donde se presentan 1 108 artículos científicos relacionados con afectaciones a la salud causadas por el uso de glifosato^{5,9}. Las afectaciones más frecuentes mencionadas en los estudios son trastornos en el sistema reproductivo, hepatotoxicidad, trastornos en el sistema inmunitario, afectaciones en el sistema digestivo y problemas relacionados con el sistema nervioso como el efecto en el aprendizaje y la memoria, comportamiento depresivo en adultos y aumento en los niveles de ansiedad¹². El glifosato afecta el Sistema Nervioso Central mediante la alteración de los neurotransmisores, afectando así la memoria e reconocimiento de manera significativa, la actividad locomotora y la memoria¹³. La exposición crónica al glifosato resulta tóxica en el organismo del ser humano, causando toxicidad en células placentarias, alteraciones en la estructura del ADN y muerte celular en hígado¹. Disminuye la producción de testosterona y afecta la morfología de los tubos seminíferos afectando los procesos de reproducción¹⁴. Representa un potencial citotóxico y genotóxico en glóbulos blancos mononucleares humanos (HMWB), las composiciones comerciales inducen una muerte celular significativa, así como el aumento del daño en el ADN¹⁵. Tiene un efecto sobre el ADN de células mononucleares de sangre periférica humana induciendo roturas en cadenas simples y dobles de ADN, así como la oxidación de purinas y pirimidinas¹⁶. Estudios en conejos muestran el efecto del glifosato en la disminución del peso corporal así como de la lívido y el volumen de eyaculación y la concentración de esperma¹⁷.

En Tailandia se detectó la presencia de altos niveles de glifosato y paraquat en mujeres embarazadas, se analizó el suero materno y el cordón umbilical al momento del parto en los que se detectaron altas cantidades de plaguicidas. No se encontraron diferencias en la presencia residual de plaguicidas entre las mujeres dedicadas a la actividad agrícola y las mujeres que se dedicaban a otra actividad con algún integrante de la familia que se dedicaba a la actividad agrícola¹⁸. En 2019, una revisión de casos de estudio en personas que se dedican a actividades agrícolas reportó que

en casi cuatro mil muestras de orina humana, fue detectable el glifosato. Así mismo, se encontró que después de un periodo de tiempo prolongado con exposición constante, los niveles de concentración aumentan y permanecen en personas que cambian de actividad económica¹⁹. También existen trabajos que exponen que el glifosato no causa daño al ser humano, se han realizado estudios en comunidades del norte de Italia con las personas que viven cerca de las unidades de producción donde se usan diversos plaguicidas y no se ha encontrado relación entre las tasas de cáncer y la exposición pasiva a los agroquímicos utilizados²⁰.

La Comisión Europea de Agricultura aplazó su uso hasta el año 2022 y se encuentra prohibido en países como Alemania, Arabia Saudita y Vietnam⁷. Por tal motivo la presencia de glifosato en alimentos está comprobada desde el punto de vista fisiológico y más aún cuando en Estados Unidos en el año 1996 se destinaban más de 16 mil toneladas de glifosato para la producción de maíz²¹. El maíz es una de las materias primas que se utilizan para la elaboración de cereales de desayuno, pero también se utiliza el trigo, el arroz y la avena, además de utilizarse otro tipo de aditivos como azúcar, sal, extracto de malta, jarabe de maíz²². En Estados Unidos casi el 90% de la superficie agrícola está ocupada por cultivos como el maíz, soya y algodón, tolerantes a herbicidas. En México, el uso de glifosato ha aumentado en 1 500% a partir de 1996 y hasta 2018 y sus aplicaciones están relacionadas también a cultivos como maíz, algodón y soya genéticamente modificados para ser resistentes al glifosato⁵. Por tal motivo los granos y cereales son uno de los alimentos que pueden contener glifosato, pero a pesar de ello no hay muchos estudios específicos sobre detección de residuos de glifosato en cereales procesados.

Los estudios que se han realizado han sido en un total de 7 955 incluyendo productos frescos y procesados como cereales (trigo, maíz, avena, cebada, trigo y quinoa), bebidas, legumbres, productos de soja, alimentos infantiles y comidas rápidas o congeladas. En un 42% de estas muestras se detectaron residuos de glifosato, donde el 99% de estas estuvieron entro de los rangos seguros Canadienses que no sobrepasaron las 13 ppm²³. También se han analizado productos de pan y harina con 164 muestras en total incluyendo distintas presentaciones de harina y pan de distintos supermercados, teniendo distinto número de muestras entre ellas desde siete hasta 22 muestras por tipo. Las concentraciones detectadas en estos productos estuvieron por debajo de los LMP internacionales establecidos es decir, menos de 30 mg/kg para el pan y 0.5 mg/kg para la harina²⁴. Debido a esto, diferentes países han comenzado a interesarse cada vez más en conocer la relación que existe entre los problemas de salud y el uso de plaguicidas²⁵. Por tal motivo, el objetivo de este estudio fue detectar y cuantificar residuos de glifosato en muestras de cereales de desayuno

de distintas marcas tanto nacionales como internacionales, comercializadas en cadenas comerciales del municipio de Saltillo, Coahuila, México, con el fin de detectar si el proceso de elaboración es suficiente para que el glifosato se degrade en estos alimentos que son consumidos frecuentemente.

Materiales y Métodos

Este estudio se realizó en la ciudad de Saltillo, Coahuila, México, localizada al sureste del estado en las coordenadas 101°26'59'' latitud Norte. Limita al norte con el municipio de Ramos Arizpe, al sur con los estados de San Luis Potosí y Zacatecas, al suroeste con el municipio de Parras, al este con el municipio de Parras, al este con el municipio de Arteaga y el estado de Nuevo León y al oeste con el municipio de Parras²⁶.

Se colectaron distintas muestras de cereales de desayuno obtenidas de tiendas comerciales de la ciudad de Saltillo. Se realizaron tres muestreos con el fin de obtener muestras de distintos lotes, el primero se realizó en el mes de noviembre de 2021, el segundo muestreo se realizó en el mes de marzo de 2022, el tercero se realizó en el mes de marzo de 2023. En cada muestreo se colectaron muestras de 12 cereales de distintas presentaciones y distintas marcas, cinco de marcas internacionales (cereal de avena con malvaviscos; hojuelas de cereal multigrano de maíz, trigo, avena y arroz con almendras y miel; cereal de trigo, arroz y maíz; avena de hojuelas enteras y cereal de granos de arroz inflado con sabor a chocolate), una de marca nacional (hojuelas de maíz azucaradas), dos de marcas propias de cadenas comerciales (cereal integral y cereal de maíz y arroz sabor chocolate) y cuatro muestras de cereal a granel (dona de colores de maíz, trigo y avena, arroz inflado sabor chocolate, avena de hojuela entera y cereal integral de salvado de trigo). El número de muestras se determinó de acuerdo con las posibilidades de análisis así como el equipo con el que se cuenta para realizar las extracciones, se optó por obtener muestras que representen los distintos tipos de marcas y presentaciones más reconocidas. En los estudios realizados se han empleado un número de muestras variados, desde 164 hasta más de 2 000, sin embargo estos incluyen una variedad de productos no solo de cereales, el número de muestras de cereales puede variar, no hay un número de muestra estándar para el análisis, ya que en distintos estudios han trabajado hasta con siete muestras de cereal de desayuno^{23,24,27}.

Procedimiento de extracción

La extracción de glifosato se llevó a cabo utilizando el método Soxhlet, para ello se trituraron las muestras de cereal y de cada una se pesaron 10 g para colocarlo en el extractor con papel filtro. Como disolvente se utilizaron 180 mL de hexano, se dejó en una mantilla de calentamiento y se llevó a ebullición

hasta completar un total de 5 ciclos. Una vez finalizado el proceso el producto final se recolectó en frascos de vidrio color ámbar. Para la eliminación del solvente, cada muestra que se obtuvo de la extracción se llevó a evaporación total en una plancha de calentamiento a una temperatura constante para después reconstituir con 15 mL de agua destilada, se conservaron en viales par su inyección en el HPLC.

Análisis cromatográfico

Para la detección de glifosato se utilizó un Cromatógrafo de Líquidos de Alta Eficiencia (HPLC), marca Agilent modelo 1100 Series acoplado a un detector UV-Vis. Se utilizó una columna en fase reversa Agilent Varían Pursuit de 5 mm de diámetro, 150 mm de longitud y 4.6 mm de diámetro de partícula, se realizó la detección a una longitud de onda de 234 nm y a una temperatura de 21.2 °C. Como disolventes de arrastre se utilizó acetonitrilo (A) y agua grado HPLC (B) (70:30). La velocidad del flujo se mantuvo en 0.5 mL/min con un volumen de inyección de 20 µL.

Curva de calibración

Para obtener la curva de calibración y poder identificar y cuantificar los plaguicidas en el HPLC, se prepararon estándares con disoluciones de glifosato de uso comercial en agua destilada con el fin de identificar la eficacia del uso de productos comerciales para este tipo de estudios. Se prepararon seis distintas concentraciones en el rango de 0.05 mg/ml a 1 mg/ml. Se inyectaron XX µl de cada dilución en el HPLC, una vez obtenidas las áreas bajo la curva de cada concentración, estas se graficaron y con ello se obtuvo la ecuación de la recta y el coeficiente de determinación (R^2) con el fin de verificar la confiabilidad de los resultados obtenidos. Estos datos se utilizaron para la cuantificación de glifosato de las muestras de cereales analizadas.

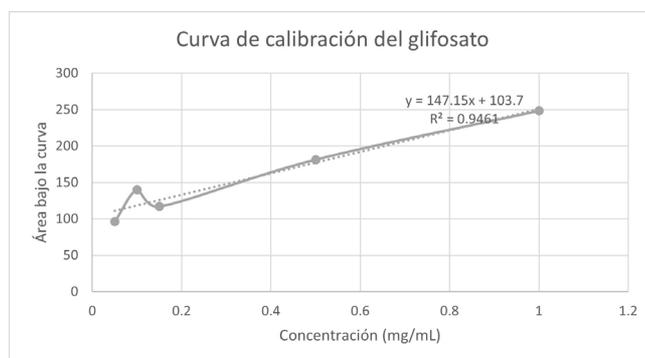
Los resultados se compararon con los Límites Máximos Residuales establecidos por el CODEX ALIMENTARIUS en cereales en grano (30 mg/kg) excepto maíz y arroz, para maíz (5 mg/kg)²⁸ y para arroz la US EPA determina 0.1 mg/kg⁶. Así mismo, se consultaron las normas de producción de la Unión Europea y de Estados Unidos con la finalidad de conocer si existen restricciones vigentes relacionadas al uso, venta y comercialización del glifosato.

Resultados

Una vez obtenidas las lecturas del HPLC de las soluciones estándar, se utilizaron las áreas bajo la curva para cada una de las concentraciones inyectadas de glifosato. Estos resultados se graficaron para la obtención de la ecuación de la recta y la obtención del valor del coeficiente de determinación (R^2), resultado un valor de 0.9461 (Figura 1), lo que demuestra

que los resultados son confiables para la cuantificación. Con las áreas obtenidas de los estándares se cuantificó la concentración de glifosato presente en las muestras de cereales analizadas. El coeficiente de determinación se ha determinado en distintos estudios de cuantificación de plaguicidas, estando nuestros resultados dentro de los rangos utilizados para este método^{29,30}.

Figura 1. Se muestran los valores de las áreas bajo la curva de las distintas concentraciones de glifosato inyectadas en HPLC, en donde se obtuvo la ecuación de la recta y el valor de coeficiente de determinación (R^2).



Fuente: Elaboración propia. Derivado de análisis de estándares en HPLC.

Cuantificación de plaguicidas

Se detectaron residuos de plaguicidas en el 100% de las muestras analizadas. Para el mes de noviembre las concentraciones más altas se detectaron en el cereal de marca internacional de cereal multigrano con almendras y miel con una concentración de 2 420 mg/kg, seguida de la muestra de cereal de avena con malvaviscos con 2 000 mg/kg, el cereal de marca internacional de arroz inflado sabor chocolate tuvo una concentración de 1 720 mg/kg, estos tres cereales representan las concentraciones más altas entre los 12 cereales analizados (Tabla 1). Se puede observar que las marcas internacionales contenían una mayor concentración de glifosato. Prevalció una concentración más baja en los cereales a granel y los de marcas nacionales. La concentración más baja detectada fue en el cereal de marca nacional de hojuelas azucaradas con 170 mg/kg.

El segundo muestreo se realizó en el mes de marzo en muestras de las mismas características y cuidando que se tratara de un lote distinto a los que se analizaron anteriormente. Las concentraciones más altas se encontraron en tres cereales de marcas internacionales, de granos de arroz inflado sabor chocolate, cereal de trigo y maíz, y cereal multigrano con almendras y miel; obteniendo respectivamente concentraciones de 2 000, 1 900 y 1 700 mg/kg. Sin embargo, a diferencia del análisis anterior, dos muestras de

Tabla 1. Concentración de glifosato en muestras de cereal de distintas marcas y presentaciones colectadas en noviembre de 2021 y marzo 2022 (mg/kg).

No.	Marca y origen	Descripción	Muestreo 1. C mg/kg	Muestreo 2. mg/kg	Muestreo 3. mg/kg	Promedio
1	Internacional	Cereal de avena con malvaviscos	2 000	1 000	433	1 144
2	Internacional (Hecho en E.E.U.U.)	Cereal multigrano con almendras y miel	2 420	1 700	268	1 463
3	Internacional (Hecho en México)	Granos de arroz inflado sabor chocolate	1 720	2 000	601	1 440
4	Internacional (Hecho en México)	Cereal de trigo, maíz y arroz	380	1 900	635	972
5	Internacional (Hecho en México)	Avena	410	800	504	571
6	Marca propia cadena comercial (Hecho en México)	Cereal integral	420	1 500	464	442
7	Marca propia cadena comercial (Hecho en México)	Bolitas de maíz y arroz chocolate	700	1 000	364	532
8	Nacional (Hecho en México)	Hojuelas azucaradas	170	800	442	471
9	A granel	Avena	260	1800	395	818
10	A granel	Aros de colores	200	1700	529	810
11	A granel	Arroz inflado sabor chocolate	380	600	539	506
12	A granel	Cereal integral	470	700	397	522

Se resalta en negritas la concentración más alta por muestreo y en recuadros los promedios más altos detectados.

Fuente: Elaboración propia. Derivado del análisis en HPLC.

cereal a granel de avena y los aros de colores presentaron concentraciones mucho mayores con 1 800 y 1 700 mg/kg respectivamente. A diferencia del primer muestreo el cereal con concentración más baja fue el de arroz inflado sabor chocolate a granel con 600 mg/kg, pero la concentración fue mayor que la obtenida en el cereal de hojuelas azucaradas del primer muestreo, donde la más baja fue de 170 mg/kg. En el tercer muestreo los cereales con mayor concentración también fueron los cereales de marcas internacionales, dos hechos en México y uno en Estados Unidos. El más bajo en este caso fue el cereal multigrano con almendras y miel con 268 mg/kg y la concentración más alta se detectó en el cereal de trigo, maíz y arroz con 635 mg/kg. De acuerdo con los promedios obtenidos, las concentraciones más altas fueron cereales de marcas internaciones con rangos mayores a los 1 000 mg/kg. Dos de ellos son hechos en México y uno es hecho en E.E.U.U. El cereal con concentración más baja fue el cereal integral de marca propia de una cadena comercial y es hecho en México (Tabla 1).

Discusión

Los resultados obtenidos demuestran la presencia de residuos de glifosato en todos los cereales analizados, tanto de marcas nacionales como internacionales, así como cereales que se comercializan a granel. Las cantidades identificadas de residuos de glifosato en cereales procesados comestibles superan los límites máximos de residuos (LMR) establecidos en el CODEX ALIMENTARIUS, para glifosato en cereales de grano los resultados superaron el LMR de 30 mg/kg, es

decir si se toma en cuenta la concentración más alta detectada que fue de 2 420 mg/kg, este sobrepasa 60 veces más lo que se establece para no causar daño a la salud. Los cereales hechos a base de maíz sobrepasaron el LMR establecido que es de 5 mg/kg³¹, el más alto que fue de 1 900 mg/kg que sobrepasa más de 300 veces el límite establecido³¹. Las concentraciones obtenidas en cereales a base de arroz fueron también mayores que los LMR establecidos por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (U.S. EPA) que establece una concentración de 0.1 mg/kg⁶.

Las concentraciones que se detectaron en este estudio fueron en su mayoría mayores a las concentraciones que se han estudiado que pueden causar distintos tipos de daños en la salud, se ha determinado que una exposición crónica (12 semanas) de glifosato a una concentración de 250 y 500 mg/kg puede ocasionar alteraciones sobre la memoria de reconocimiento y de retención y la memoria de trabajo³⁵. En ensayos en ratas se determinó que una dosis de glifosato de 400 mg/kg puede producir mutaciones y daño citogenético³². Incluso concentraciones pequeñas desde 1 mg/L de glifosato afecta la motilidad de los espermatozoides y causa una disfunción mitocondrial de la región intermedia de los espermatozoides³³.

Hay pocos estudios publicados sobre la presencia de residuos de glifosato en alimentos procesados, y los que se han realizado han sido en una variedad de alimentos que tienen como base granos de cereales. Los residuos de glifosato en alimentos procesados se han reportado en distintas partes

del mundo, pero en todas han resultado concentraciones bajas, menores al LMR establecido por el CODEX ALIMENTARIUS^{23,34,35}, estos resultados son contrarios a los resultados que se obtuvieron en este estudio. Se han detectado residuos de glifosato menores a los detectados en este estudio, en productos como la miel, jarabe de maíz, salsa de soja, leche de soja y tofu comercializados en el área metropolitana de Filadelfia, muestras de miel presentaron concentraciones mayores a los límites de cuantificación (15 ng/g) con rangos de entre 17-163 ng/g y muestras de salsa de soja se cuantificaron residuos de entre 88 y 564 ng/g, mayores a los límites de cuantificación determinados (75 ng/g)³⁴. Los resultados encontrados en cereales a base de maíz difieren con los detectados en otros estudios realizados en productos comercializados derivados del maíz como harinas comerciales, tostadas, cereales y tortillas procedentes de México y otros países de América y Europa, donde se detectaron resultados positivos a glifosato en un 27.7% de las muestras con concentraciones de 0.01 a 0.045 mg/kg¹ las cuales no sobrepasan los LMR establecidas para este grano (5 mg/kg)³⁶. También nuestros resultados difieren de los detectados en productos procesados de Canadá como cereales infantiles, bocadillos, barras de granola y barras de cereal, reportando residuos de glifosato con concentraciones de entre 0.006 a 2.5 mg/kg, determinados como no dañinos a la salud²³.

Específicamente en cereales de desayuno también se han reportado concentraciones menores a las detectadas, en suiza en cereales de desayuno se han detectado entre 0.001 a 0.291 mg/kg de glifosato, esto se determinó en 10 muestras de distintos tipos de cereales como como copos de maíz, palomitas de maíz y cereales hechos de avena³⁷. El hecho de que se hayan detectado residuos de plaguicidas en productos procesados incluyendo a los cereales de desayuno, refiere que a pesar del proceso de elaboración que emplea cada producto este no es suficiente para degradar el glifosato. Si bien el tratamiento térmico que se emplea en el proceso de elaboración, puede llegar a degradar algunos compuestos que puedan ser volátiles del glifosato, este suele encontrarse en formulaciones como sal o éster, por lo que el proceso de degradación por medio de la cocción de los cereales puede no ser eficaz⁶. Esto ha sido analizado en estudios durante el proceso de elaboración de productos como el pan, en los que se demostró que después de la fermentación por cuatro horas y después de realizar la cocción del pan conteniendo glifosato, el glifosato no se degradó de forma significativa²⁷. Existen pocos estudios que comprueben la degradación de los plaguicidas en los alimentos después de ser procesados, por ello es necesario que se sigan realizando investigaciones para conocer el comportamiento de los plaguicidas en ciertos procesos.

A pesar de que las concentraciones detectadas en distintos estudios de alimentos procesados no sobrepasen los límites establecidos para granos, no se cuenta con límites establecidos para productos procesados a base de cereales. Por lo que la presencia de glifosato por encima del LMP en granos de cereales, puede ser una fuente de preocupación para la salud humana. Si bien la U.S. EPA, ha publicado que no existen riesgos de preocupación para la salud humana en cuanto al uso del glifosato, si este es aplicado de acuerdo con lo que indica la etiqueta y que es poco probable que el glifosato sea un carcinógeno humano; no se toma en cuenta que en muchos casos los productores no cuentan con capacitación necesaria para la aplicación de plaguicidas, haciendo un uso irracional del glifosato, sobrepasando las dosis establecidas en la etiqueta del producto^{38,39}, por lo que el riesgo de exposición en los alimentos puede resultar mayor como en el caso de este estudio.

Los cereales de origen internacional (Estados Unidos) coincidieron en tener las concentraciones más altas de glifosato. El uso del glifosato en los cultivos está relacionada a la presencia de cultivos resistentes a este producto, por lo que las altas concentraciones de glifosato pueden explicarse debido a que en este país cerca del 90% de su superficie agrícola se encuentra ocupado por cultivos de maíz, soya y algodón, tolerantes a herbicidas. Además se usa el 19% del glifosato utilizado a nivel mundial⁵. En los cereales de origen mexicano también se detectaron concentraciones altas pero menores a las de origen internacional. A pesar de que se produzcan en México se sabe que el 95% de maíz amarillo es importado de EE.UU. En México no se sabe exactamente la cantidad de glifosato utilizado, sin embargo si se sabe que se han otorgado desde el 2005, 651 permisos para siembra de cultivos genéticamente modificados de algodón, maíz, trigo y soya, de estos el 77.6% son cultivos resistentes al glifosato. Estas cifras nos proporcionan una visión del uso del glifosato en cultivos que son la materia prima para la elaboración de los cereales⁵. Aunado a esto la venta y distribución de glifosato no está restringida en México y su costo es muy accesible, es por ello que se considera uno de los herbicidas más usados en el campo mexicano. Hasta el año 2015 dos de cada tres unidades de producción aplicaban glifosato².

En cuanto al daño que pueden causar en la salud humana las concentraciones detectadas, donde la más alta fue de 2 420 mg/kg, se puede comparar con los dosis estudiadas en ratones Wistar, que son los organismos más estudiados para detectar los daños causados por el glifosato. Se ha detectado que una exposición crónica de una dosis de al menos 500 mg/kg puede causar alteraciones en la memoria de reconocimiento y retención, afecta la memoria de trabajo⁴⁰. Las dosis detectadas también pueden afectar los procesos reproductivos ya que dosis de hasta 450 mg/kg provocan en crías de ratas macho una disminución en la producción de espermatozoides, además

provoca un aumento en la producción de espermatozoides con características anormales, también disminuye los niveles de testosterona en la pubertad⁴¹. Hay estudios que muestran distintas dosis que pueden tener efectos genotóxicos en los humanos a causa de la exposición al glifosato, estas dosis son menores a las detectadas en este estudio donde la menor fue de 170 mg/kg, estas son mucho mayores las que se manejan para provocar un daño genotóxico, que van desde 0.5 µg/mL hasta 125µg/mL. También cabe destacar que las concentraciones detectadas son mayores a las concentraciones permitidas como ingesta diaria que es de 0.5 µg/mL⁷.

Conclusiones

La detección de glifosato en las muestras confirma que a pesar del proceso de elaboración de los cereales de desayuno, el glifosato no es degradado completamente durante el proceso. Esto puede representar un riesgo a la salud de las personas que consumen este tipo de alimentos, debido a que las concentraciones se encuentran por encima de las establecidas por el CODEX ALIMENTARIUS.

Resulta entonces importante realizar más estudios de este tipo, con el fin de monitorear la inocuidad de los productos alimenticios industrializados para consumo humano formulados a base de cereales y granos. Además de ser necesario que se implementen estrategias con el fin de hacer un uso adecuado en la aplicación de plaguicidas, en este caso del glifosato, con el fin de reducir los riesgos a la salud en los consumidores.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflicto de interés.

Contribución de los autores

Conceptualización y diseño, Y.M.O.F., A.G.C.C., A-C-G.; Metodología, A.C.G., A.G.C.C.; Adquisición de datos y Software, Y.M.O.F., E.C.C.; Análisis e interpretación de datos, A.C.G., A.G.C.C.; Investigador Principal, A.G.C.C. Investigación, Y.M.O.F., E.C.C., Redacción del manuscrito, A.C.G., A.G.C.C.; Preparación del borrador original, A.C.G., A.G.C.C.; Redacción revisión y edición del manuscrito, Y.M.O.F.; Visualización, Y.M.O.F., E.C.C.; Supervisión, Y.M.O.F.; Adquisición de fondos, Y.M.O.F., E.C.C.

Financiamiento

Esta investigación no recibió financiamiento externo.

Referencias

- Xiii V, Julieta Salazar López María Lourdes Aldana Madrid N. Herbicida glifosato: usos, toxicidad y regulación. glyphosate herbicide: uses, toxicity and regulation. [cited 2021 Oct 29]; Available from: <http://biotecnia.unison.mx/index.php/biotecnia/article/view/83>
- Hernández Sierra R, García Luzón D, Romero Zepeda H. Uso del glifosato en México. *Rev Iberoam Bioética*. 2021;(17):1–12.
- Cruz-Ortiz L, Flores-Méndez M. Avances en el desarrollo de nuevos herbicidas biológicos a partir de extractos vegetales fitotóxicos aplicados in vitro. *Inf Técnico* [Internet]. 2021;86(1):34–45. Available from: <http://doi.org/10.23850/22565035.3648>
- Ramírez F. El herbicida glifosato y sus alternativas. *Univ Nac Inst Reg Estud en Sust Tóxicas* [Internet]. 2021;1–29. Available from: https://www.conacyt.gob.mx/cibiogem/images/cibiogem/Documentos-recopilatorios-relevantes/El_herbicida_glifosato_y_sus_alternativas_UNA.pdf
- Conacyt. Expediente científico sobre el glifosato y los cultivos GM. *Cons Nac Cienc y Tecnol* [Internet]. 2020;(2018):31. Available from: https://conacyt.mx/wp-content/uploads/documentos/glifosato/Dossier_formato_glifosato.pdf
- Xu J, Smith S, Smith G, Wang W, Li Y. Glyphosate contamination in grains and foods: An overview. *Food Control* [Internet]. 2019;106(March). Available from: <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2019.106710>
- Lara-Rodríguez AM, Páez-Almanza V, Manrique-torres O V., Guevara-Medina CJ, Alarcón Vargas AF, Arenas NE, et al. Efectos del glifosato en la expresión de algunos genes y sus implicaciones en la salud humana. *Revista Ciencias Agropecuarias* [Internet]. 2020;6(2):71–82. Available from: http://revistas.ucundinamarca.edu.co/index.php/Ciencias_agropecuarias/article/view/328
- Zanabria RB, Bickel U, Jacobi J. Plaguicidas químicos usados en el cultivo de soya en el Departamento de Santa Cruz, Bolivia: riesgos para la salud humana y toxicidad ambiental. *Acta Nov* [Internet]. 2019;9(3):386–416. Available from: http://www.scielo.org.bo/scielo.php?pid=S1683-07892019000300005&script=sci_abstract
- Kogevinas M. ¿Es canerígeno el glifosato? *Investig Cienc*. 2018;46.



10. IARC. Q&A on Glyphosate. Int Agency Res Cancer [Internet]. 2016;33(March 2015):2015–7. Available from: https://www.iarc.fr/wp-content/uploads/2018/11/QA_Glyphosate.pdf
11. Bejarano F. Los plaguicidas altamente peligrosos en México. 1th. ed. Texcoco, México: Red Acción sobre Plaguicidas y Alternativas en México, AC; 2017 [Internet]. Available from: <https://www.rapam.org/wp-content/uploads/2017/09/Libro-Plaguicidas-Final-14-agst-2017sin-portada.pdf>
12. Martín E. Antología Toxicológica del Glifosato. 5 th. ed. Naturaleza de derechos; 2020 [Internet]. Available from: https://conacyt.mx/cibiogem/images/cibiogem/comunicacion/publicaciones/antologia_toxicologica_glifosato.pdf
13. Javier C, Eugenia C, Raisman-vozari R, Minetti A. Neurotoxicology and Teratology Behavioral impairments following repeated intranasal glyphosate-based herbicide administration in mice. Neurotoxicol Teratol [Internet]. 2017;64:63–72. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ntt.2017.10.004>
14. Romano RM, Romano MA, Bernardi MM, Furtado P V., Oliveira CA. Prepubertal exposure to commercial formulation of the herbicide glyphosate alters testosterone levels and testicular morphology. Arch Toxicol. 2010;84(4):309–17.
15. Nagy K, Tessema RA, Budnik LT, Ádám B. Comparative cyto- and genotoxicity assessment of glyphosate and glyphosate-based herbicides in human peripheral white blood cells. Environ Res. 2019;179:108851.
16. Woźniak E, Sicińska P, Michałowicz J, Woźniak K, Reszka E, Huras B, et al. The mechanism of DNA damage induced by Roundup 360 PLUS, glyphosate and AMPA in human peripheral blood mononuclear cells - genotoxic risk assesment. Food Chem Toxicol [Internet]. 2018; Available from: <https://doi.org/10.1016/j.fct.2018.07.035>
17. Yousef MI, Salem MH, Helmi S, Seehy MA. Toxic effects of carbofuran and glyphosate on semen characteristics in rabbits. J Environ Sci Heal. 2008;30(4):513–34.
18. Kongtip P, Nankongnab N, Phupanchaensuk R, Palarach C, Sujirarat D, Sangprasert S, et al. Glyphosate and Paraquat in Maternal and Fetal Serums in Thai Women. J Agromedicine [Internet]. 2017;22(3):282–9. Available from: <https://doi.org/10.1080/1059924X.2017.1319315>
19. Gillezeau C, Gerwen M Van, Shaffer RM, Rana I, Zhang L, Sheppard L, et al. The evidence of human exposure to glyphosate: a review. Environ Heal [Internet]. 2019;18(2):1–14. Available from: <https://doi.org/10.1186/s12940-018-0435-5>
20. Malagoli C, Costanzini S, Heck JE, Malavolti M, De Girolamo G, Oleari P, et al. Passive exposure to agricultural pesticides and risk of childhood leukemia in an Italian community. Int J Hyg Environ Health [Internet]. 2016;219(8):742–8. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheh.2016.09.015>
21. Altieri M a., Pengue W a. La soja transgénica en América Latina. Una maquinaria de hambre, deforestación y devastación socioecológica. Biodiversidad [Internet]. 2006; 47:14–9. Available from: <https://grain.org/e/1090>
22. Lezcano E. Cereales para el desayuno ricos en fibra. Secr Agric Ganad y Pesca. 2015; 1:26–37.
23. Kolakowski BM, Miller L, Murray A, Leclair A, Bietlot H, Van De Riet JM. Analysis of Glyphosate Residues in Foods from the Canadian Retail Markets between 2015 and 2017. J Agric Food Chem [Internet]. 2020;68(18):5201–11. Available from: <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.9b07819>
24. Bou-Mitri C, Mekanna AN, Dagher S, Moukarzel S, Farhat A. Occurrence and exposure to glyphosate present in bread and flour products in Lebanon. Food Control [Internet]. 2022;136(February):108894. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2022.108894>
25. García Hernández J, Leyva Morales JB, Martínez Rodríguez IE, Hernández Ochoa MI, Aldana Madrid ML, Rojas García AE, et al. Estado actual de la investigación sobre plaguicidas en México. Rev Int Contam Ambient [Internet]. 2018;34(Special Issue 1):29–60. Available from: <https://doi.org/10.20937/RICA.2018.34.esp01.03>
26. Gobierno del estado de Coahuila. Saltillo [Internet]. Saltillo, Coahuila, México; 2017. Available from: https://coahuila.gob.mx/flash/conoce_coahuila/mapas/pdfs/salttillo.pdf
27. Gélinas P, Gagnon F, McKinnon C. Wheat preharvest herbicide application, whole-grain flour properties, yeast activity and the degradation of glyphosate in bread. Int J Food Sci Technol [Internet]. 2018;53(7):1597–602. Available from: <https://doi.org/10.1111/ijfs.13741>

28. FAO. CODEXALIMENTARIUS FAO-WHO [Internet]. Codex Alimentarius. 2012. Available from: <https://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/search/es/?cx=018170620143701104933%3Aq82jsfba7w&q=glyphosate&cof=FORID%3A9>
29. Cantú PC, Meza MM, Valenzuela AI, Osorio C, Zamorano HG, Cota PG, et al. Determinación de plaguicidas organoclorados en hortalizas del sur de Sonora: calidad y seguridad de los alimentos en relación a los límites máximos permitidos safety of foods in relation to the maximum permissible limits. *Biotecnia* [Internet]. 2019;XXI(2):19–27. Available from: <https://biotecnia.unison.mx/index.php/biotecnia/article/view/902/318>
30. Flores-García ME, Molina-Morales Y, Balza-Quintero A, Benítez-Díaz PR, Miranda-Contreras L. Residuos de plaguicidas en aguas para consumo humano en una comunidad agrícola del estado Mérida, Venezuela. *Invest Clin* [Internet]. 2011;52(4):295–311. Available from: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22523840>
31. Pesticide Detail | CODEXALIMENTARIUS FAO-WHO [Internet]. [cited 2022 Dec 13]. Available from: https://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/codex-texts/dbs/pestres/pesticide-detail/en/?p_id=158
32. Torres M, Urroz GC, Beatriz M, Ovando G, Vera U, Hand L, et al. La genotoxicidad del herbicida glifosato evaluada por el ensayo cometa y por la formación de micronúcleos en ratones tratados. *Theoria*. 2006;15(2):53–60.
33. Anifandis G, Amiridis G, Dafopoulos K, Daponte A, Dovolou E, Gavriil E, et al. Human Sperm Motility and Sperm Mitochondria. *Toxics*. 2018;6(1):1–9.
34. Rubio F, Guo E, Kamp L. Survey of Glyphosate Residues in Honey, Corn and Soy Products. *J Environ Anal Toxicol* [Internet]. 2014;05(01):1–8. Available from: <http://dx.doi.org/10.4172/2161-0525.1000249>
35. Villaamil EC, Bovi G, Nassetta M. Situación actual de la contaminación por plaguicidas en Argentina. *Rev Int Contam Ambient* [Internet]. 2013;29:24–46. Available from: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=37028958002>
36. González-Ortega E, Piñeyro-Nelson A, Gómez-Hernández E, Monterrubio-Vázquez E, Arleo M, Dávila-Velderrain J, et al. Pervasive presence of transgenes and glyphosate in maize-derived food in Mexico. *Agroecol Sustain Food Syst* [Internet]. 2017;41(9–10):1146–61. Available from: <https://doi.org/10.1080/21683565.2017.1372841>
37. Zoller O, Rhyn P, Rupp H, Zarn JA, Geiser C. Glyphosate residues in Swiss market foods: monitoring and risk evaluation. *Food Addit Contam Part B Surveill* [Internet]. 2018;11(2):83–91. Available from: <http://dx.doi.org/10.1080/19393210.2017.1419509>
38. Hernández Sierra R, García Luzón D, Romero Zepeda H. Uso del glifosato en México. *Rev Iberoam Bioética* [Internet]. 2021;(17):1–12. Available from: <https://doi.org/10.14422/rib.i17.y2021.007>
39. Esquivel-Valenzuela B, Cueto-Wong JA, Valdez-Cepeda RD, Pedroza-Sandoval A, Trejo-Calzada R, Pérez-Veyna Ó. Prácticas de manejo y análisis de riesgo por el uso de plaguicidas en la Comarca Lagunera, México. *Rev Int Contam Ambient*. 2019;35(1):25–33.
40. Bali YA, Kaikai N, Ba-m S, Bennis M. Learning and memory impairments associated to acetylcholinesterase inhibition and oxidative stress following glyphosate based-herbicide exposure in mice. *Toxicology* [Internet]. 2019;415(January):18–25. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.tox.2019.01.010>
41. Dallegrave E, Mantese FD, Oliveira RT, Andrade AJM, Dalsenter PR, Langeloh A. Pre- and postnatal toxicity of the commercial glyphosate formulation in Wistar rats. 2007;81:665–73.