

AFLATOXINAS Y FUMONISINAS EN MASA DE MAÍZ NIXTAMALIZADO EN EL SALVADOR

RESULTADOS DEL MONITOREO



Universidad
Dr. Andrés Bello
La Universidad de la innovación



Comisión de Acreditación
de la Calidad de la Educación Superior
UNAB
INSTITUCIÓN ACREDITADA
2024-2029

2023
2024

AREA SALUD
CHALATENANGO



Roberto Hernández-Rauda
Óscar Peña-Rodas
Gissell Arbaiza
Marvin Cuadra
Martha Guzmán-Rodríguez

Dirección de Investigación y Proyección Social
Coordinación Unidad de Investigación
Laboratorio de Inocuidad Alimentaria

INFORME CIENTÍFICO

Aflatoxinas y fumonisinas en masa de maíz nixtamalizado en El Salvador: Resultados del monitoreo 2023-2024. Énfasis Chalatenango.

Roberto Hernández-Rauda, Óscar Peña-Rodas,
Gissell Arbaiza, Marvin Cuadra y Martha Guzmán-Rodríguez

INDICE

Introducción	2
Material y Métodos	5
Resultados	8
Discusión	12
Conclusiones	17
Tablas (1-8)	19
Referencias	29

INFORME CIENTÍFICO

Aflatoxinas y fumonisinas en masa de maíz nixtamalizado en El Salvador: Resultados del monitoreo 2023-2024. Énfasis Chalatenango.

Roberto Hernández-Rauda ^a

Óscar Peña-Rodas ^b

Gissell Arbaiza ^c

Marvin Cuadra ^d

Martha Guzmán-Rodríguez ^c

Hallazgos destacables

- Prevalencia y contenidos de aflatoxinas en masa de maíz varían según estación y localidad.
- Prevalencia y contenidos de fumonisinas en masa de maíz determinados solo en época seca.
- Ingesta diaria estimada de aflatoxinas y fumonisinas en masa de maíz exceden valores guía.
- Ingesta de masa de maíz con aflatoxinas y fumonisinas es un riesgo potencial a la salud.

Palabras clave¹: Aflatoxinas, Fumonisinias, Masa de maíz nixtamalizada, Ingesta diaria estimada, El Salvador.

Resumen

La base de la dieta de los salvadoreños es el maíz. Los granos de maíz son susceptibles a la contaminación por aflatoxinas y fumonisinas. Hay evidencia sobre cambios estacionales en la prevalencia y contenidos de estas micotoxinas en los derivados del maíz en países Mesoamericanos. Existen datos sobre contaminación por estas micotoxinas para países de esta región, pero no hay datos disponibles para El Salvador, aun cuando el 90% de la población consume derivados del maíz. Por tanto, esta investigación se orientó a monitorear los cambios estacionales en la prevalencia y contenidos de AFT y de FBs en masa de maíz nixtamalizado como

^a Dirección de investigación y Proyección Social, Universidad Doctor Andrés Bello. roberto.rauda@unba.edu.sv

^b Laboratorio de Inocuidad Alimentaria, Universidad Doctor Andrés Bello, San Salvador. oscar.pena@unab.edu.sv

^c Laboratorio de Inocuidad Alimentaria, Universidad Doctor Andrés Bello, San Miguel. lady.arbaiza@unab.edu.sv y marthaidalia.guzman@unab.edu.sv

^d Coordinación Unidad de Investigación, Universidad Doctor Andrés Bello, Sonsonate. marvin.cuadra@unab.edu.sv

materia base de las tortillas; además, estimar la ingesta diaria de ambas micotoxinas como indicador de exposición de la población salvadoreña. Se encontró que la proporción de casos positivos a AFT fue baja (20%) y varió por localidad y época del año, aunque no significativamente. Menos del 2% de la muestra y ninguno de los contenidos promedio excedió el límite máximo (10 µg/kg). La proporción de casos positivos a las FBs fue muy baja (< 7%), detectada únicamente en la estación seca, pero el contenido promedio excedió el límite máximo de 1.0 mg/kg. La ingesta promedio estimada (EDI) de AFT varió estacionalmente y todos los valores excedieron el valor guía de 0 ng/kg pc/día. Aunque no pudo demostrarse la variación estacional de la ingesta promedio estimada de FBs, todos los valores EDI superaron el valor guía de 1 µg/kg pc/día. Por tanto, la ingesta de masa de maíz nixtamalizado contaminado con AFT o con FBs es un riesgo potencial a la salud de los salvadoreños.

Introducción

El término aflatoxinas totales (AFT) se refiere típicamente a la suma de las variantes AFB1, AFB2, AFG1, AFG2; y el término fumonisinas (FBs) a la suma de las variantes FB1, FB2 [1]. Ambos grupos son micotoxinas producidas por mohos de los géneros *Aspergillus* spp. y *Fusarium* spp., respectivamente, que colonizan comúnmente al maíz [2, 3, 4]. La contaminación del maíz por las AFT o por las FBS o su variante principal FB1, tiene implicaciones para la salud de los consumidores humanos de los productos derivados de este grano. En el caso de las AFT, existe suficiente evidencia para considerarlas como agentes carcinogénicos, clasificadas como Grupo 1 [4, 5, 6], además de ser hepatotóxicos y genotóxicos para los humanos [2, 7]. En el caso de las FBs, hay evidencia suficiente de su carcinogenicidad en animales, pero insuficiente para las personas [8], por lo que se clasifican como posibles agentes carcinogénicos para los humanos en el Grupo 2B [4, 5].

Establecida la propensión del maíz a la contaminación por AFT y FBs, estudios relativamente recientes, realizados en países de la región Mesoamericana aportan datos sobre prevalencia y contenidos de una o ambas micotoxinas en granos enteros de maíz.

En el caso de las AFT, se reportan prevalencias desde 6% hasta 59% y contenidos promedio desde 6.5 $\mu\text{g}/\text{kg}$ hasta 215 $\mu\text{g}/\text{kg}$, durante la estación seca (diciembre a mayo) para Honduras [9], El Salvador [10], y Costa Rica [11]. Durante la estación lluviosa (junio a noviembre), se encontraron prevalencias de 36% a 81% y contenidos promedio de 6.2 $\mu\text{g}/\text{kg}$ a 63 $\mu\text{g}/\text{kg}$ en Guatemala [12] y en Honduras [13], denotando variabilidad estacional tanto en la prevalencia como en los niveles de AFT en el maíz.

Los valores de prevalencia y de contenido de las FBs o de la FB1, medidos durante la estación lluviosa variaron de 80% a 98%, y de 2.6 a 7.2 mg/kg en Guatemala [12] y en Honduras [13]. Durante la época seca, la prevalencia registrada fue de 97% y los niveles entre 2.7 y 3.2 mg/kg en Honduras [9], indicando una variación estacional atenuada de las FBs en comparación con las AFT.

En masa y tortillas, que son derivados de maíz nixtamalizado (es decir sometido a cocción alcalina utilizando cal), la prevalencia y contenidos promedio de AFT o de AFB1 variaron de 13% a 95% y de 1.1 $\mu\text{g}/\text{kg}$ a 9.5 $\mu\text{g}/\text{kg}$ durante la estación lluviosa en México [2, 14] y en Honduras [13]. En la estación seca, la prevalencia varió de 5% a 89% y los niveles se encontraron entre 0.5 $\mu\text{g}/\text{kg}$ a 9.4 $\mu\text{g}/\text{kg}$ en México [2, 14, 15, 16].

La prevalencia y contenidos de las FBs o de la FB1 en los derivados del maíz nixtamalizado variaron de 36% a 92%, y de 0.14 mg/kg a 4.1 mg/kg durante la estación lluviosa en México [2] y en Honduras [13]. En la estación seca, los únicos valores de prevalencia (98%) y de contenido (0.7 mg/kg) se reportaron en México [17]. Sobre la base de los datos anteriores, se considera que la variación de los valores es muy amplia y, por tanto, es difícil establecer cualquier tendencia de cambio estacional, tanto para las AFT como para las FBs.

Por otra parte, es necesario establecer la estimación de cuán expuestos están los consumidores salvadoreños a las AFT y las FBs, por medio del cálculo de la ingesta diaria estimada (EDI) [18], basada en el consumo y en los contenidos de estas micotoxinas encontrados en los derivados del maíz nixtamalizado como un indicador preliminar de exposición. Con respecto a esto, no pudo

encontrarse datos disponibles de estimación de la ingesta diaria de AFT y de FBs para El Salvador y la que se halló fue escasa y referida a otros países de Mesoamérica.

En México se reportan valores EDI entre 1.9 y 3.6 ng/kg*pc/día de AFT durante la estación lluviosa y entre 0.9 y 1.7 ng/kg*pc/día en la estación seca [2, 16]. En Honduras se reportó datos EDI entre 8.7 y 15.4 ng/kg*pc/día durante la estación lluviosa [13]. Todos estos valores exceden la norma de 0.0 ng/kg*pc/día de AFT ingerida en los alimentos [7, 19], en concordancia con el principio “tan bajo como sea razonablemente alcanzable” (ALARA) [7].

Los valores EDI para las FBs o para la FB1 en derivados de maíz nixtamalizado, encontrados en México variaron desde 0.1 hasta 0.24 µg/kg*pc/día en la estación lluviosa y desde 0.17 hasta 2.0 µg/kg*pc/día en la época seca [2, 17] e incluso hasta 4.8 µg/kg*pc/día sin especificarse la estación [20]. En el caso de Honduras, se reportaron datos EDI entre 21.7 hasta 33.6 µg/kg*pc/día de FBs en la estación lluviosa [13]. Una parte de estos valores promedio EDI sobrepasaron el límite tolerable de ingesta diaria de FBs, establecido en 1.0 µg/kg*pc/día [8], particularmente en Honduras, país limítrofe con El Salvador.

Por tanto, la ingesta de derivados de maíz nixtamalizado contaminados con AFT y FBs representa un riesgo para la salud de los consumidores de estos países Mesoamericanos, incluyendo a El Salvador, si se considera que la masa de maíz nixtamalizado sirve como materia base para la preparación de tortillas, un componente fundamental de la alimentación de los salvadoreños, consumidas por el 90% de la población, con una ingesta promedio diaria per cápita es de 252 g/día [21].

Considerando la no disponibilidad de resultados publicados concernientes al tema en El Salvador, los objetivos de este trabajo fueron monitorear la prevalencia y contenidos de las AFT y de las FBs en masa de maíz nixtamalizado durante un año para determinar su variación durante las estaciones lluviosa y seca. Además, estimar la ingesta diaria de ambas micotoxinas contenidas en este derivado del maíz, como indicador de exposición de la población salvadoreña a estos compuestos perjudiciales para la salud.

Material y Métodos

Tipo de estudio, espécimen y muestreo

Este fue un estudio descriptivo de tipo longitudinal. Masa de maíz procesado localmente mediante cocción alcalina utilizando $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (conocida como nixtamalización) fue muestreada durante 18 meses de 36 “tortillerías” ubicadas en cinco mercados municipales y en puestos de venta aledaños.

El período de muestreo para la detección de AFT en masa de maíz se extendió durante la estación lluviosa ampliada 2023 (junio a noviembre) y en la estación seca 2023-2024 (diciembre a mayo). Se colectaron 386 muestras de cuatro localidades: Sonsonate-Región Occidental (n=39), San Salvador-Región Central (n=100), **Chalatenango-Región Norte (n=50)** y San Miguel-Región Oriental (n=197). El muestreo para detección de las FBs se realizó durante la estación seca 2023-2024 (diciembre a mayo) y en la estación lluviosa 2024 (junio a octubre). Las muestras fueron colectadas en Sonsonate (n=32), San Salvador (n=72), **Chalatenango (n=40)** y San Miguel (n=144), totalizando 288.

Todas las muestras colectadas pesaron un kilogramo, fueron mantenidas en frío durante el traslado al laboratorio y fueron almacenadas en un frigorífico a 2–4 °C hasta su procesamiento y análisis.

Preparación de las muestras, extracción y análisis de AFT y FBs

Cada muestra de 1 kg de masa de maíz nixtamalizado se extendió sobre papel Glassine para homogeneizar por mezclado y se extrajo una alícuota de 5 gramos. Cada porción se colocó en un tubo con tapa, se añadió 25 ml de solución acuosa de Metanol al 70% v/v y se homogeneizó por agitación durante 3 minutos utilizando un vortex. La suspensión resultante se filtró utilizando papel Whatman No.1 y una alícuota del filtrado se recolectó en un vial tipo Eppendorf de 2000 μl . El extracto así obtenido está listo para el análisis de AFT y, en el caso de FBs, una dilución posterior en proporción 1:80 fue requerida previo al ensayo.

La medición del contenido de AFT se realizó utilizando el kit Veratox® de alta sensibilidad con rango de cuantificación de 1 a 8 $\mu\text{g}/\text{kg}$, siguiendo el procedimiento especificado por el fabricante [22] y adoptado para la masa de maíz nixtamalizado. Para la determinación de los niveles de FBs

se usó el kit Veratox® con un rango de cuantificación de 1 a 6 mg/kg, de acuerdo a las especificaciones del fabricante [23]. La cuantificación de los contenidos de AFT se expresó como µg/kg y los niveles de FBs como mg/kg, en función de los valores de absorbancia, utilizando un equipo lector multimodal de microplacas Synergy H1M2 Agilent BioTek (Winooski, Vermont, USA), con monocromador ajustado a 650 nm. Las muestras que excedieron el límite superior de cuantificación de ambos análisis, fueron diluidas en proporción 1:2 o 1:4, según requerimiento y se reensayaron por duplicado siguiendo los procedimientos previamente indicados [22, 23].

Validación del método analítico de las AFT y las FBs

La validación del método para análisis de las AFT y las FBs se basó en la aplicación de dos criterios, la recuperación promedio y la repetibilidad [24]. La evaluación del método analítico consistió en la sobrecarga de muestras de masa de maíz nixtamalizado con tres concentraciones conocidas de AFT (1.6, 3.2 y 6.4 µg/kg) y de FBs (1.6, 3.2 y 4.8 mg/kg). En el caso de las AFT, el ensayo fue por cuadruplicado por cada nivel de sobrecarga durante 5 días consecutivos (Tabla 1). En cuanto a las FBs, el ensayo fue por triplicado por cada concentración durante 3 días consecutivos (Tabla 2). Tanto la extracción como la cuantificación de ambas micotoxinas fue hecha de la misma forma descrita para las muestras, utilizando el mismo equipo, pero con distinto kit reactivo cada día que duró el ensayo.

La recuperación fue calculada dividiendo el contenido medido de cada muestra ensayada por la cantidad de la sobrecarga y el resultado se multiplicó por 100. La recuperación media es el promedio simple del conjunto de valores obtenidos para cada nivel de sobrecarga durante cada día del ensayo [24]. La repetibilidad o precisión intra ensayo se determinó por medio del cálculo de la desviación estándar relativa (RSD%) de los promedios de recuperación [24].

Estimación de la exposición por ingesta de las AFT y las FBs

La estimación de la exposición dietética, referida también como la cantidad de un químico ingerido por vía de los alimentos, se calcula con base en datos de consumo y de la cantidad del químico de interés, contenido en el alimento analizado [25]. La importancia de calcular los estimados de exposición dietética a un compuesto tóxico potencial o comprobado, es que se puede comparar

con un valor guía o máximo tolerable de ingesta del químico de interés [25]. En el caso de las AFT, no hay un valor máximo tolerable de ingesta por lo que se adoptó la norma de 0.0 ng/kg*pc/día especificada en otros trabajos [7, 19]. Para las FBs, se adoptó el límite máximo tolerable de ingesta diaria de FBs, establecido en 1.0 µg/kg*pc/día [8].

Considerando lo anterior, los valores estimados de ingesta diaria tanto de las AFT como de las FBs se calcularon utilizando el procedimiento aplicado en estudios similares [9, 16, 17, 26], que consistió en multiplicar el contenido promedio de cada micotoxina con el consumo diario promedio de la masa de maíz nixtamalizado en forma de tortillas y ese resultado se dividió por el peso promedio de la población salvadoreña adulta, sin distinción de sexo. El uso del contenido promedio de ambas micotoxinas en el alimento analizado, se basó en una consideración técnica aplicable para la estimación de la exposición dietética a compuestos carcinogénicos y genotóxicos [27]. Siguiendo un criterio similar, para los datos de consumo diario per cápita de masa de maíz nixtamalizado en forma de tortillas, se utilizaron los promedios disponibles para la población de todo el país, así como de las cuatro regiones en las que se realizó el muestreo [21]. Para los cálculos, se utilizó el promedio simple de los datos disponibles del peso promedio de la población adulta de El Salvador, sin distinción de sexo [28].

Análisis estadístico

La significación de las diferencias encontradas en el ensayo de validación del método analítico, así como en los niveles promedio y en la prevalencia de AFT y de FBS entre la estación lluviosa y la época seca se detectaron por medio de ANOVA y de las pruebas t de Student y Chi cuadrado, respectivamente. La homogeneidad de las varianzas se demostró por la aplicación de la prueba de Levene. En todas las pruebas, se especificó un valor de significación $p < 0.05$.

La correlación entre parámetros meteorológicos y los contenidos promedio de las AFT fue determinada utilizando el coeficiente r de Pearson. Las pruebas estadísticas y figuras fueron hechos con el programa IBM Estadístico v.27 para Windows.

Consideraciones éticas

En este estudio, solo se utilizó muestras de masa de maíz nixtamalizado disponible para venta al público. Ninguna información de los vendedores ni la obtención de tejidos de animales vivos fue necesaria, por tanto, el consentimiento de los informantes o la aplicación de una guía para experimentación con animales no fueron requeridos.

Resultados

Parámetros de validación del método para cuantificar AFT y FBs en masa de maíz nixtamalizado.

Los valores de recuperación promedio (%) y los coeficientes de variabilidad en condiciones de repetibilidad como parámetros de validación del método para analizar AFT y FBs se presentan en las Tablas 1 y 2, respectivamente. La recuperación promedio de AFT para el ensayo de cinco días varió entre 94.57 y 105.73 para las tres concentraciones de sobrecarga y ninguno excedió el límite superior de 120%. Los coeficientes de variabilidad (RSD%) disminuyeron de 42.19 a 33.99 a medida que aumentó la concentración de sobrecarga (Tabla 1), pero se mantuvieron por debajo del umbral establecido en 45.3% para contenidos de 1 µg/kg. Los valores para la HORRAT variaron entre 0.99 y 1.01, manteniéndose dentro del rango de 0.3 a 1.3. Tanto la recuperación media como los RSD% no variaron significativamente entre los cinco días del ensayo de validación ($F=0.705$, 4 df, $p=0.404$; $F=0.206$, 4 df, $p=0.934$, respectivamente).

En el caso de los parámetros de validación del análisis de la FBs, la recuperación promedio varió de 100.63 a 108.44, manteniéndose por debajo del umbral del 120% (Tabla 2). Aunque los RSD% decrecieron de 42.16 a 35.60 a medida que incrementó la concentración de sobrecarga (Tabla 2), estos valores excedieron el umbral de 16 para contenidos de 1 mg/kg. La HORRAT tuvo valores entre 0.99 y 1.00, en el rango esperado de 0.3 a 1.3. Los valores de recuperación media y los RSD% tampoco variaron significativamente entre los tres días del ensayo de validación de la FBS ($F=0.840$, 2 df, $p=0.443$; $F=0.027$, 2 df, $p=0.973$, respectivamente).

Variación estacional de casos positivos y contenidos de AFT.

Los conteos y frecuencias de aparición de muestras de masa de maíz nixtamalizado positivas a AFT para las épocas lluviosa 2023 y seca 2023-2024, distribuidas en cuatro localidades de El Salvador, se presentan en la Tabla 3; los promedios de lluvia acumulada, temperatura ambiente y humedad relativa se muestran también para las mismas localidades.

En general, las prevalencias de muestras con contenidos de AFT cuantificables de las cuatro localidades monitoreadas variaron, pero no de forma significativa ($\chi^2=0.745$, 3 df, $p=0.868$), tampoco entre las dos épocas del año que se contrastaron ($\chi^2=4.172$, 2 df, $p=0.118$, Tabla 3). Al comparar las proporciones de la totalidad de muestras positivas a las AFT, el valor obtenido durante la época seca fue ligeramente mayor en comparación con la estación lluviosa (23.9% vs. 19.9%, Tabla 3). No obstante, el análisis de resultados por localidad demostró que la prevalencia de muestras con contenidos cuantificables de AFT fue significativamente mayor San Salvador durante la época seca comparada con la estación lluviosa (42.2% vs. 14.6%, $\chi^2=15.730$, 3 df, $p=0.001$), mientras que las localidades de Sonsonate, **Chalatenango** y San Miguel **no mostraron variaciones significativas (Tabla 3).**

La proporción de casos que excedieron el límite máximo de AFT ($>10 \mu\text{/kg}$) fue de 1.8% para San Salvador, 1.9% para San Miguel y 1.5% para la totalidad de muestras recolectadas durante la época lluviosa; **mientras que ningún caso positivo excedió el límite en el resto de localidades durante la misma estación (Tabla 3). En la época seca no se detectaron muestras que excedieran el límite máximo de AFT en ninguna de las cuatro localidades del estudio.**

Las muestras colectadas en las cuatro localidades tuvieron contenidos promedio de AFT mayores durante la época lluviosa comparados con la época seca; aunque las diferencias no fueron significativas (Figura 1). Al contrastar los valores de contenido de AFT de ambas estaciones para la totalidad de muestras, se demostró que el promedio fue significativamente mayor en la época lluviosa que en la seca ($3.64 \mu\text{g/kg}$ vs. $1.93 \mu\text{g/kg}$, $t=2.973$, 51.199 df, $p=0.004$). **En todo caso, tanto los promedios por localidad y época, así como de la totalidad de muestras**

no excedieron el límite máximo especificado para la AFT en derivados de maíz destinados para el consumo humano (Figura 1).

Los contenidos promedios de AFT de las muestras de maíz se analizaron para determinar su asociación con los parámetros meteorológicos temperatura ambiente y humedad relativa mostrados en la Tabla 3. No pudo demostrarse la asociación significativa entre la totalidad de valores de contenido de AFT y la temperatura ambiente (Pearson $r = 0.181$, $p = 0.099$, $n = 84$); sin embargo, si pudo demostrarse la asociación positiva entre ambas variables, pero solo en la estación seca (Pearson $r = 0.365$, $p = 0.016$, $n = 43$). Se demostró también que la humedad relativa está asociada significativamente y de forma positiva con los contenidos de AFT (Pearson $r = 0.270$, $p = 0.013$, $n = 84$), indistintamente de la época del año.

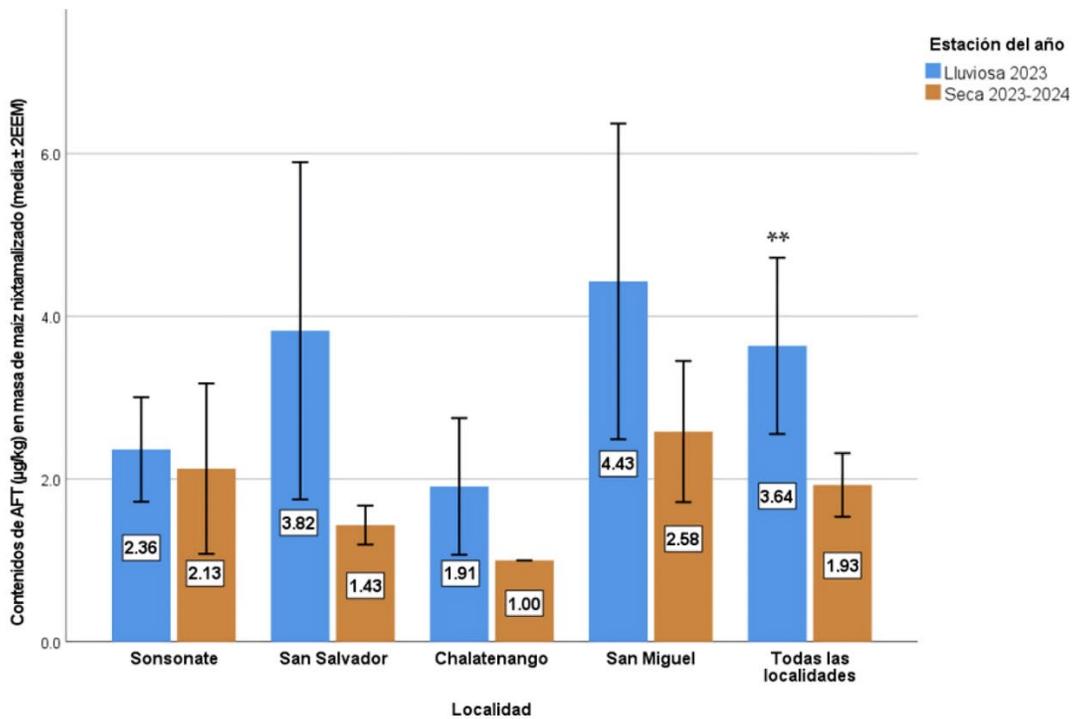


Figura 1. Variación estacional de los contenidos cuantificados de AFT en masa de maíz nixtamalizado.

Variación estacional de casos positivos y contenidos de FBs.

Los conteos y frecuencias de aparición de muestras de masa de maíz nixtamalizado positivas a FBs colectadas en las cuatro localidades del estudio para las épocas seca 2023-2024 y lluviosa 2024, se presentan en la Tabla 4; se muestran también los promedios de lluvia acumulada, temperatura ambiente y humedad relativa para las mismas localidades y épocas.

Del total de 180 muestras analizadas durante la época seca 2023-2024, solo 12 fueron positivas a FBs y excedieron el límite máximo de 1.0 mg/kg, de estas 10 se recolectaron en San Salvador (22.2%) y 2 en San Miguel (2.2%), de manera que la proporción de casos que excedieron el límite para la totalidad de muestras de la época seca fue de 6.7% (Tabla 4). Ninguna muestra de las 108 colectadas durante la época lluviosa 2024 presentó niveles cuantificables de FBs, indistintamente de la localidad; precisamente por esta razón no fue posible hallar diferencias significativas que evidenciaran variación estacional.

Los contenidos promedio de FBs de las muestras colectadas durante la época seca fue 3.21 mg/kg en San Salvador, 1.48 mg/kg en San Miguel y para la totalidad de las muestras fue 2.92 mg/kg (Tabla 4). Todos los promedios de FBs excedieron el límite máximo especificado para maíz destinado a consumo humano.

Caracterización del riesgo a la salud de los consumidores de masa de maíz nixtamalizado

La ingesta diaria de masa nixtamalizada de maíz en forma de tortilla se estimó en 255 g/día para la región occidental, 161 g/día para la región central, **268 g/día para zona norte** y 308 para zona oriental, y el promedio de las cuatro zonas fue de 252 g/día para una persona adulta con peso promedio de 73.7 kg, indistintamente del sexo. Con estos datos y los contenidos promedio de AFT obtenidos para las cuatro localidades durante las épocas lluviosa y seca, se calculó la ingesta diaria estimada (EDI) como estimador de riesgo potencial a la salud humana por exposición a esta micotoxina.

Los valores promedio EDI de las AFT por los consumidores de masa de maíz nixtamalizado fueron mayores durante la época lluviosa comparados con la estación seca, sin excepción (Tabla 5) y los datos más altos se obtuvieron en la región oriental-San Miguel (18.53 ng/kg*pc/día) y en el

colectivo de localidades (12.44 ng/kg*pc/día). **Considerando que el valor límite tolerable es de 0.0 ng/kg*pc/día para la ingesta de las AFT, por sus propiedades genotóxicas, todos los contenidos detectados en la masa de maíz nixtamalizado representan un riesgo potencial para la salud, indistintamente de la localidad y estación del año (Tabla 5).**

Los valores promedio EDI de las FBs por consumo de masa de maíz nixtamalizado se calcularon para San Salvador (7.02 µg/kg*pc/día), San Miguel (6.19 µg/kg*pc/día) y para el colectivo (9.99 µg/kg*pc/día), registrados únicamente durante la estación seca 2023-2024 (Tabla 6). Todos los valores anteriores excedieron el límite tolerable de ingesta diaria (TDI) de FBs (1.0 µg/kg*pc/día). En la época lluviosa 2024, no se detectaron niveles cuantificables de FBs y, por consiguiente, los valores de exposición no fueron calculados.

La mayoría del conjunto de datos generados y analizados durante el presente estudio están disponibles en <https://doi.org/10.17632/rnjgwjtn9r.1> [29].

Discusión

Validación del método analítico

El método de análisis de AFT en masa de maíz nixtamalizado fue validado satisfactoriamente, tanto la recuperación promedio (98.7% a 105.7%) como los valores de reproducibilidad-RSD_R (33.99 a 42.19) están en los rangos establecidos como aceptables (40% a 120% y menores de 45.3, respectivamente) [22]. Otros estudios realizados en tortillas, harina y masa de maíz presentan valores similares de recuperación de AFT (87% a 93%) [14], AFB₁(95%, 96% y 100%) [2, 15, 16] y de AFB₂ (96% y 98%) [2, 15].

El método de análisis de las FBs fue también validado. Los valores de recuperación promedio (100.6% a 108.4%) se ajustaron al rango establecido como aceptable (80% a 110%), no así los valores de reproducibilidad (35.6 a 42.2) que excedieron el límite de 16 [22]. No obstante, la recuperación promedio de las FBs en masa de maíz nixtamalizado coincidió con los valores presentados en otras validaciones de análisis realizadas en harina de maíz para masa (FB₁ 92% y 99%, FB₂ 88%) [13, 20] y en masa de maíz nixtamalizado (FB₁ 118%, FB₂ 110%) [17].

Prevalencia y contenidos de AFT en masa de maíz nixtamalizado

El análisis de datos de prevalencia de AFT en masa de maíz nixtamalizado, obtenidas en el colectivo de localidades, demuestra que un porcentaje muy bajo (< 2%) excedió el nivel máximo de 10 µg/kg especificado por el Codex Alimentarius y la Comisión Europea [30] durante la estación lluviosa, mientras que ninguna muestra sobrepasó ese límite máximo en la estación seca. Las pocas muestras que excedieron el límite máximo para las AFT se colectaron en San Salvador-Región Central y en San Miguel-Región Oriental (Tabla 3), lugares donde funcionan centros de acopio de maíz proveniente de distintas partes del país para cubrir la demanda local para consumo humano.

De forma general, la prevalencia de muestras conteniendo AFT que no exceden el límite máximo no presentó diferencias significativas entre los valores de las estaciones lluviosa y seca, variando del 18.4% al 23.9%, respectivamente (Tabla 3). La excepción a esta tendencia se detectó en San Salvador-Región Central, que tuvo una prevalencia significativamente menor en la época lluviosa en comparación a la seca (14.6% vs. 42%, Tabla 3). Aun con las diferencias anteriores, los datos indican una prevalencia muy baja de contaminación por AFT en la masa de maíz nixtamalizado (aproximadamente 20%, Tabla 3), indistintamente de la época, similar a los valores presentados en un estudio previo (15%), pero realizado en tortillas de maíz [14] (Tabla 7).

Otros estudios realizados en países de Mesoamérica no muestran variaciones significativas en las prevalencias de Aflatoxinas asociadas con las estaciones seca y lluviosa, tanto para las AFT en tortilla de maíz nixtamalizado (72.5% vs. 85% y 15.5% vs. 13.2%) [2, 14], así como de AFB1 en el mismo producto (89% vs. 80%) [15] (Tabla 7).

Respecto a los contenidos de AFT en masa de maíz nixtamalizado, los promedios fueron mayores durante la estación lluviosa en comparación con la seca para cada una de las cuatro localidades muestreadas, aunque las diferencias no fueron significativas (Figura 1). No obstante, al analizar el total de datos se determinó que el contenido promedio de AFT en la estación lluviosa fue significativamente mayor que durante la época seca (3.64 ± 0.54 vs. 1.93 ± 0.20 µg/kg), aunque ninguno de valores superó el límite máximo de 10 µg/kg [1, 30]. El hecho que los

contenidos de AFT fueron mayores durante la estación lluviosa puede explicarse por la asociación estadísticamente significativa que se demostró entre los niveles promedio y los valores de la humedad relativa ($r = 0.270$, $p < 0.05$), que fueron más elevados en la época húmeda comparada con la seca (Tabla 3). Respecto a la asociación anterior, estudios realizados en El Salvador y Guatemala demostraron que las muestras de maíz en grano extraídas de lugares de almacenamiento con promedios más elevados de humedad relativa presentaban mayor positividad a la contaminación por AFT [10, 31].

Al contrastar los datos obtenidos en este trabajo con los resultados de estudios previos, realizados en países de Mesoamérica, resalta la similitud de los contenidos promedio de AFT o AFB1 en masa de maíz nixtamalizado en las estaciones lluviosa y seca (1.89 y 1.2 $\mu\text{g}/\text{kg}$, respectivamente) [13, 16] o en tortillas durante las mismas épocas (1.96, 1.09, 1.06 y 0.51, $\mu\text{g}/\text{kg}$, respectivamente) [2, 3] (Tabla 7).

Resalta el hecho que los contenidos promedio de AFT o AFB1 en masa de maíz nixtamalizado o en tortillas son bajos al compararlos con los contenidos detectados en el grano entero de maíz para El Salvador (9.4 a 24.6 $\mu\text{g}/\text{kg}$) [10], Honduras (6.23, 6.5 a 7.2 $\mu\text{g}/\text{kg}$) [9, 13], Guatemala (63 $\mu\text{g}/\text{kg}$ y 2 a 85 $\mu\text{g}/\text{kg}$) [12, 31], y Costa Rica (28 a 62 $\mu\text{g}/\text{kg}$) [11].

La razón más probable que explica los bajos contenidos en la masa de maíz o en las tortillas que se reportan en este trabajo y los estudios anteriores, es el proceso de nixtamalización del maíz, que consiste en la cocción alcalina de los granos de maíz con agua y cal [3]. De hecho, la disminución efectiva del contenido promedio de AFT como efecto de la nixtamalización y del horneado, se evidenció con los resultados de un trabajo reciente, pasando de 6.23 $\mu\text{g}/\text{kg}$ en grano entero a 1.89 $\mu\text{g}/\text{kg}$ en masa de maíz y, posteriormente, a 1.06 mg/kg en tortillas [13]. Es conocido que la nixtamalización puede reducir el contenido de AFT en la masa de maíz en un rango entre 60% y 65%, y en las tortillas en un rango entre 70% y 80% [3, 32]. Otros estudios reportan reducciones entre el 72% y el 82% del contenido de AFT en masa de maíz nixtamalizado [13, 33].

La prevalencia de FBs en el total de muestras de masa de maíz nixtamalizado, obtenidas en las cuatro localidades durante la estación seca fue muy baja (< 7%, Tabla 4). Las 12 muestras positivas a FBs, excedieron el límite máximo de 1 mg/kg especificado por la Comisión Europea [1] y fueron colectadas en las localidades de San Salvador-Región Central (n = 10) y en San Miguel-Región Oriental (n = 2, Tabla 4), lugares que funcionan como centros de acopio de maíz de otras partes del país para cubrir la demanda local.

Durante la estación lluviosa 2024, no se detectaron muestras positivas a las FBs en las cuatro localidades del presente estudio.

Los resultados presentados en estudios previos, realizados en países de Mesoamérica, indican valores de prevalencia de las FBs mayores que los encontrados en este trabajo, tanto en harina de maíz para masa (53%) [20], en masa nixtamalizada (60% y 98%) [13, 17] y en tortillas (87.5% a 97.5% y 36%,) [2, 13] (Tabla 8). La baja prevalencia de las FBs en masa de maíz que se encontró en este trabajo respecto a los valores de estudios previos podría deberse a diferencias en los límites de cuantificación de los métodos analíticos utilizados. En el presente caso, contenidos de FBs por debajo de 1.0 mg/kg no fueron cuantificados, tampoco se reportaron como trazas.

Los contenidos promedio de FBs en las muestras de San Salvador (3.21 ± 0.46 mg/kg), San Miguel (1.48 ± 0.53 mg/kg) y del colectivo de localidades (2.92 ± 0.35 mg/kg) fueron similares a niveles promedio o a las medianas encontrados en otros países mesoamericanos, tanto en harina para masa (1.02 mg/kg) [20], en masa nixtamalizada y en tortillas (4.11 y 2.66 mg/kg, respectivamente) [13] (Tablas 4 y 8). Incluso, los contenidos promedios de FBs hallados en el presente estudio, fueron mayores que los promedios o medianas reportados en otros estudios realizados en la misma área geográfica, tanto para masa nixtamalizada (0.71 mg/kg) [17] y en tortillas (0.064 a 0.137 mg/kg) [2] (Tablas 4 y 8).

La mayoría de contenidos promedio de FBs o de FB1 cuantificados en derivados de maíz nixtamalizado son similares o menores que los niveles encontrados en granos enteros de maíz, según los resultados de estudios realizados en México (1.39 a 1.70 mg/kg y 0.14 a 16.7 mg/kg)

[34, 35], Guatemala (2.6 mg/kg y 0.4 a 31 mg/kg) [12, 31] y Honduras (2.7 a 3.2 mg/kg y 7.16 mg/kg) [9, 13].

Relacionado con la tendencia antes descrita, el proceso de nixtamalización y del horneado posterior redujeron de forma efectiva el contenido promedio de FBs, pasando de 7.16 mg/kg en grano entero a 4.11 mg/kg en masa de maíz y a 2.66 mg/kg en tortillas, según los resultados de un trabajo reciente [13], de forma similar a lo observado con los contenidos de AFT.

Con respecto a esa disminución, se ha reportado que las FBs son muy solubles al agua y que lixivian con facilidad al líquido resultante tanto de la cocción alcalinizada durante la nixtamalización (conocida como *Cernada* o *Nejayote*), como del enjuague de los granos tratados. La remoción de ambos líquidos residuales y del material sólido constituido por el pericarpio, punta de la tapa y el germen de los granos, contribuirán a la reducción de las FBs en el maíz nixtamalizado [3]. La disminución de los contenidos de FBs, específicamente de la FB1, puede variar entre el 68% al 72% que se trasfiere a la fracción líquida residual por efecto de la nixtamalización [3], y entre el 89% y 96%, que lixivian a la *Cernada* o *Nejayote* y al material sólido residual [36].

Ingesta diaria estimada de AFT y FBs por consumo de masa de maíz nixtamalizado

Los valores de ingesta diaria estimada de AFT en masa de maíz nixtamalizado fueron mayores durante la estación lluviosa que en la seca, debido a los contenidos más altos durante la primera época comparada con la segunda (Tabla 5). También se notaron diferencias geográficas en los valores EDI, predominantemente en San Miguel-Región Oriental, debido al mayor consumo de masa de maíz en forma de tortillas. Un estudio realizado en México describió también valores EDI para AFT en tortillas de maíz nixtamalizado más altos durante la estación lluviosa tardía en comparación con los registrados durante la época seca, a consecuencia de diferencias similares en los contenidos promedio de AFT [2].

En el presente trabajo, todos los valores promedio EDI incumplen la norma de 0.0 ng/kg*pc/día de AFT ingerida en los alimentos [7, 19], indistintamente de la estación del año y de la localidad geográfica (Tabla 5). Con respecto a estos resultados, otros trabajos realizados

en países de Mesoamérica, reportan también valores promedio EDI que incumplen con esa norma o valor guía, sea en masa de maíz nixtamalizado (15.4 y 1.7 ng/kg*pc/día) [13, 16] y en tortillas (1.9 a 3.6 y 8.7 ng/kg*pc/día) [2, 13].

Los valores promedio EDI para las FBs en masa de maíz nixtamalizado no tuvieron la variación estacional que fue observada para las AFT y estuvo restringida territorialmente a dos localidades en las regiones central (7.02 µg/kg*pc/día) y oriental del país (6.19 µg/kg*pc/día) respectivamente (Tabla 6). **Todos los valores promedio EDI sobrepasaron el límite tolerable de ingesta diaria de FBS, establecido en 1.0 µg/kg*pc/día [8].**

Otros estudios realizados en la región mesoamericana presentan valores promedio EDI que superan también este valor límite, por ejemplo, en harina instantánea de maíz (4.86 µg/kg*pc/día) [20], en masa de maíz nixtamalizado (33.57 y 2.02 µg/kg*pc/día) [13,17], y en tortillas (21.72 µg/kg*pc/día) [13].

La gran variabilidad observada en el contraste de los valores promedio EDI se debe fundamentalmente a las diferencias que tienen los países o las regiones tanto en la ingesta diaria de los derivados de maíz nixtamalizado, como de los contenidos promedio de las AFT y de las FBs.

En cualquier caso, la ingesta diaria de AFT o de FBs en la masa de maíz nixtamalizado debería preocupar por el riesgo potencial a la salud de la población salvadoreña por el consumo de este derivado contaminado en forma de tortillas.

Conclusiones

El método de análisis de AFT y de FBs en masa de maíz nixtamalizado fue validado satisfactoriamente, basado en valores aceptables de recuperación y de reproducibilidad, que coinciden con los resultados de validación de otros estudios similares.

La proporción de casos positivos a contaminación por AFT en masa de maíz nixtamalizado fue baja (aproximadamente 20%) y varió entre las localidades de muestreo y las dos épocas del año, aunque no de forma significativa. Por otra parte, la proporción de casos que

superaron el límite máximo de 10 µg/kg fue muy bajo (< 2%) y se detectó únicamente en la estación lluviosa 2023. Precisamente en esta época se tuvo el mayor contenido promedio de AFT para el colectivo de localidades muestreadas, probablemente asociado a la mayor humedad relativa promedio que se registró durante esa estación del año. No obstante, este nivel promedio de AFT no superó el límite máximo establecido para el maíz destinado a consumo humano.

Respecto a la contaminación por FBs, la proporción de casos fue muy baja (< 7%), detectada en la estación seca 2023-2024, en las localidades del centro y oriente del país, con ausencia de muestras positivas a FBs durante la estación lluviosa 2024. El contenido promedio de todas las muestras contaminadas por FBs excedió el límite máximo de 1.0 mg/kg.

Respecto a los bajos niveles promedio de AFT y de FBs encontrados en la masa de maíz durante todo el período de muestreo, podría explicarse por el proceso de nixtamalización que reduce los contenidos de ambas micotoxinas en rangos entre el 60% y 80% para las AFT, y para la FBs entre el 70% y el 90%, según los resultados obtenidos en estudios previos realizados en maíz y el proceso de preparación de tortillas.

Los valores de ingesta estimada de AFT en masa de maíz nixtamalizada variaron estacionalmente, de forma similar a los cambios en los contenidos promedio de esta micotoxina. Además, todos los valores EDI excedieron la norma o valor guía de 0 ng/kg*pc/día, tanto los que se calcularon con base en los promedios como en el percentil 95 de los contenidos de AFT. En el caso de la ingesta estimada de FBs, aunque no pudo demostrarse la variación estacional, todos los valores EDI excedieron también el valor guía de 1 µg/kg*pc/día. Por lo anterior e indistintamente de las variaciones estacionales o geográficas, la ingesta de masa de maíz nixtamalizado contaminado con AFT o con FBs constituye un riesgo potencial a la salud de la población de El Salvador que consume este derivado en forma de tortillas.

Tabla 1. Parámetros de la eficacia del método para cuantificar Aflatoxinas (AFT) en muestras sobrecargadas de masa de maíz nixtamalizado.

Niveles de sobrecarga $\mu\text{g}/\text{kg}$	Día 1 repetibilidad (mínimo n=5 por nivel)		Día 2 repetibilidad (mínimo n=4 por nivel)		Día 3 repetibilidad (at least n=4 per level)		Día 4 repetibilidad (at least n=5 per level)		Día 5 repetibilidad (at least n=4 per level)		Promedio de 5 días (n=71)		Coeficiente de variación bajo condiciones de repetibilidad (RSD%)	Repetibilidad intralaboratorio (mínimo n=23 por nivel) [24]	
	Recuperación media (%)	RSD (%)	Recuperación media (%)	RSD (%)	Recuperación media (%)	RSD (%)	Recuperación media (%)	RSD (%)	Recuperación media (%)	RSD (%)	Recuperación media (%)	RSD (%) ¹			PRSD (%)
1.60	111.25	41.11	89.06	42.67	76.56	43.49	95.00	42.05	96.25	41.97	94.57	42.19	41.73	1.01	
3.20	110.63	37.10	87.50	38.38	105.63	37.31	97.50	37.75	132.81	36.04	105.73	37.36	37.61	0.99	0.3 to 1.3
6.40	96.56	34.10	89.06	34.52	105.63	33.65	103.44	33.73	96.88	34.05	98.70	33.99	33.89	1.00	

¹ Porcentajes de recuperación aceptables desde 40% a 120%, y valores aceptables de RSD% deben ser ≤ 45.3 , según Horwitz [24].

Tabla 2. Parámetros de la eficacia del método para cuantificar Fumonisinias (FBs) en muestras sobrecargadas de masa de maíz nixtamalizado.

Niveles de sobrecarga mg/kg	Day 1 repetibilidad (mínimo n=3 por nivel)		Day 2 repetibilidad (mínimo n=3 por nivel)		Day 3 repetibilidad (n=4 por nivel)		Promedio de 3 días (n=30)		Coeficiente variación bajo condiciones de repetibilidad (RSD%)	Repetibilidad intralaboratorio (mínimo n=10 por nivel) [24]	
	Recuperación media (%)	RSD (%)	Recuperación media (%)	RSD (%)	Recuperación media (%)	RSD (%)	Recuperación media (%)	RSD (%) ¹		PRSD (%)	HORRAT
1.60	100.00	42.20	104.17	41.93	98.44	42.31	100.63	42.16	42.16	1.00	
3.20	113.54	37.27	113.54	37.27	100.78	37.96	108.44	37.55	37.99	0.99	0.3 to 1.3
4.80	102.78	35.60	100.00	35.75	104.69	35.50	102.71	35.60	35.74	1.00	

¹ Porcentajes de recuperación aceptables desde 80% a 110%, y valores aceptables de RSD% deben ser ≤ 16.0 , según Horwitz [24].

Tabla 3. Prevalencia de las Aflatoxinas en masa de maíz nixtamalizado y parámetros meteorológicos en cuatro localidades de El Salvador.

Estación del año	Clasificación basada en niveles de AFT. Parámetros meteorológicos (cantidad de lluvia, temperatura y humedad relativa)	Localidades muestreadas				
		Sonsonate (Occidente)	San Salvador (Centro)	Chalatenango (Norte)	San Miguel (Oriente)	Todas las localidades
Estación lluviosa extendida junio – noviembre 2023	Muestras que exceden el nivel máximo (>10.00 µg/kg)	0 (0.0%)	1 (1.8%)	0 (0.0%)	2 (1.9%)	3 (1.5%)
	Con nivel cuantificable hasta el máximo (1.00 – 10.00 µg/kg)	7 (36.8%)	8 (14.6%) ^a	5 (20.0%)	18 (16.8%)	38 (18.4%)
	Con nivel no cuantificable (<1.00 µg/kg)	12 (63.2%)	46 (83.6%)	20 (80.0%)	87 (81.3%)	165 (80.1%)
	Tamaño de la muestra	19	55	25	107	206
	Lluvia acumulada (mm)	233.6	259.0	276.2	227.8	246.6
	Temperatura promedio (°C)	28.0	26.0	27.8	29.2	27.7
	Humedad relativa promedio %	78.6	85.7	79.9	80.1	81.2
Estación seca extendida diciembre 2023 – mayo 2024	Muestras que exceden el nivel máximo (>10.00 µg/kg)	0 (0.0%)	0 (0.0%)	0 (0.0%)	0 (0.0%)	0 (0.0%)
	Con nivel cuantificable hasta el máximo (1.00 – 10.00 µg/kg)	7 (35.0%)	19 (42.2%) ^b	2 (8.0%)	15 (16.7%)	43 (23.9%)
	Con nivel no cuantificable (<1.00 µg/kg)	13 (65.0%)	26 (57.8%)	23 (92.0%)	75 (83.3%)	137 (76.1%)
	Tamaño de la muestra	20	45	25	90	180
	Lluvia acumulada (mm)	26.3	23.5	44.9	28.1	30.5
	Temperatura promedio (°C)	27.5	26.6	28.7	29.5	28.3
	Humedad relativa promedio %	65.0	74.4	62.6	72.1	68.6

^{a,b} Los conteos y porcentajes con superíndices distintos difieren significativamente entre las dos estaciones del año para la misma categoría de niveles de AFT (p<0.01, test Chi cuadrado). Estación lluviosa extendida, de junio a noviembre 2023, n=206; estación seca extendida, de diciembre 2023 a mayo 2024, n=180.

Tabla 4. Prevalencia y contenidos promedio de las Fumonisinias en masa de maíz nixtamalizado y parámetros meteorológicos en cuatro localidades de El Salvador.

Estación del año	Clasificación basada en niveles de AFT. Parámetros meteorológicos (cantidad de lluvia, temperatura y humedad relativa)	Localidades muestreadas				
		Sonsonate (Occidente)	San Salvador (Centro)	Chalatenango (Norte)	San Miguel (Oriente)	Todas las localidades
Estación seca extendida diciembre 2023 – mayo 2024	Muestras que exceden el nivel máximo (≥ 1.00 mg/kg)	0 (0.0%)	10 (22.2%)	0 (0.0%)	2 (2.2%)	12 (6.7%)
	Con nivel no cuantificable (< 1.00 mg/kg)	20 (100.0%)	35 (77.8%)	25 (100.0%)	88 (97.8%)	168 (93.3%)
	Contenido promedio FBs (mg/kg) \pm SEM	NC	3.21 \pm 0.46	NC	1.48 \pm 0.53	2.92 \pm 0.35
	Tamaño de la muestra	20	45	25	90	180
	Lluvia acumulada (mm)	26.3	23.5	44.9	28.1	30.5
	Temperatura promedio ($^{\circ}$ C)	27.5	26.6	28.7	29.5	28.3
	Humedad relativa promedio %	65.0	74.4	62.6	72.1	68.6
Estación lluviosa junio-octubre 2024	Muestras que exceden el nivel máximo (≥ 1.00 mg/kg)	0 (0.0%)	0 (0.0%)	0 (0.0%)	0 (0.0%)	0 (0.0%)
	Con nivel no cuantificable (< 1.00 mg/kg)	12 (100.0%)	27 (100.0%)	15 (100.0%)	54 (100.0%)	108 (100.0%)
	Contenido promedio FBs (mg/kg) \pm SEM	NC	NC	NC	NC	NC
	Tamaño de la muestra	12	27	15	54	108
	Lluvia acumulada (mm)	297.9	359.0	356.4	327.4	333.9
	Temperatura promedio ($^{\circ}$ C)	27.6	25.7	27.8	28.1	27.3
	Humedad relativa promedio %	82.1	85.4	78.4	83.7	82.0

Ningún conteo o porcentaje difirieron significativamente entre las dos estaciones del año para la misma categoría de niveles de FBs.

Estación seca extendida, de diciembre 2023 a mayo 2024, n=180, estación lluviosa, de junio a octubre 2024, n=108. NC: No calculado

Tabla 5. Estimación del riesgo a la salud de los consumidores de masa de maíz nixtamalizado, debido a la exposición a Aflatoxinas en El Salvador.

Localidad	Estación del año	Consumo (g/día) de masa en forma de tortilla	Contenido promedio de AFT ($\mu\text{g}/\text{kg}$)	P95 Contenido de AFT ($\mu\text{g}/\text{kg}$)	Ingesta diaria estimada de AFT ($\text{ng}/\text{kg}*\text{pc}/\text{día}$)	P95 Ingesta estimada de AFT ($\text{ng}/\text{kg}*\text{pc}/\text{día}$)	Valor de referencia de la ingesta diaria de AFT (0 $\text{ng}/\text{kg}*\text{pc}/\text{día}$)
Sonsonate (Occidente)	Estación lluviosa	255	2.36	3.39	8.19	11.74	Incumplimiento
	Estación seca		2.13	4.21	7.37	14.56	Incumplimiento
San Salvador (Centro)	Estación lluviosa	161	3.82	8.65	8.36	18.91	Incumplimiento
	Estación seca		1.43	2.19	3.14	4.79	Incumplimiento
Chalatenango (Norte)	Estación lluviosa	268	1.91	3.11	6.95	11.32	Incumplimiento
	Estación seca		1.00	---	3.64	---	Incumplimiento
San Miguel (Oriente)	Estación lluviosa	308	4.43	13.48	18.53	56.35	Incumplimiento
	Estación seca		2.58	6.07	10.80	25.38	Incumplimiento
Todas las localidades	Estación lluviosa	252	3.64	10.25	12.44	35.07	Incumplimiento
	Estación seca		1.93	4.68	6.60	16.00	Incumplimiento

P95: Percentil 95

---: Dato no disponible o no calculado

Tabla 6. Estimación del riesgo a la salud de los consumidores de masa de maíz nixtamalizado, debido a la exposición a Fumonisinas en El Salvador.

Localidad	Estación del año	Consumo (g/día) de masa en forma de tortilla	Contenido promedio de FBs (mg/kg)	P95 Contenido de FBs (mg/kg)	Ingesta diaria estimada de FBs ($\mu\text{g}/\text{kg} \cdot \text{pc}/\text{día}$)	P95 Ingesta estimada de FBs ($\mu\text{g}/\text{kg} \cdot \text{pc}/\text{día}$)	Valor de referencia de la ingesta diaria de FBs ($\leq 1 \mu\text{g}/\text{kg} \cdot \text{pc}/\text{día}$)
Sonsonate (Occidente)	Estación seca	255	---	---	---	---	---
	Estación lluviosa		---	---	---	---	---
San Salvador (Centro)	Estación seca	161	3.21	4.78	7.02	10.45	Incumplimiento
	Estación lluviosa		---	---	---	---	---
Chalatenango (Norte)	Estación seca	268	---	---	---	---	---
	Estación lluviosa		---	---	---	---	---
San Miguel (Oriente)	Estación seca	308	1.48	---	6.19	---	Incumplimiento
	Estación lluviosa		---	---	---	---	---
Todas las localidades	Estación seca	252	2.92	4.77	9.99	16.31	Incumplimiento
	Estación lluviosa		---	---	---	---	---

P95: Percentil 95

---: Dato no disponible o no calculado

Tabla 7. Prevalencia, contenidos e ingesta diaria estimada de las aflatoxinas en derivados de maíz en países de Mesoamérica.

País y año del estudio citado	Derivados del maíz	Período de muestreo	Aflatoxinas						
			Prevalencia	Contenido (µg/kg o ng/g)			Ingesta diaria estimada (ng/kg*pc/día)		
				Media	Mediana	Percentil 95	Media	Mediana	Percentil 95
México, 2011 [14]	Tortillas	Abril 2006 y 2007	15.5%	9.45	NR	NR	NR	NR	NR
		Noviembre 2006 y 2007	13.2%	9.14	NR	NR	NR	NR	NR
México, 2018 [15]	Tortillas	Diciembre 2015, Tocoay	89%, AFB1	NR	1.71	NR	NR	NR	NR
			58% AFB2	NR	0.15	NR	NR	NR	NR
		Septiembre 2015, Estación Bocas	80% AFB1	NR	0.29	NR	NR	NR	NR
			AFB2 No calculada	NR	Inferior al límite de cuantificación	NR	NR	NR	NR
México, 2019 [16]	Masa y harina de maíz	Abril 2017, Mayo 2019, estación seca	5.0%, AFB1	1.2 ± 1.0	NR	NR	1.7	NR	8.3
México, 2019 [2]	Tortillas	Octubre 2013, final estación lluviosa	85.0% AFT	1.96 ± 0.39	1.06	6.95	3.6 ± 1.25	1.1	15.1
		Octubre 2014, final estación lluviosa	95.0% AFT	1.09 ± 0.18	0.72	3.38	1.9 ± 0.46	0.9	7.2

País y año del estudio citado	Derivados del maíz	Período de muestreo	Aflatoxinas						
			Prevalencia	Contenido (µg/kg o ng/g)			Ingesta diaria estimada (ng/kg*pc/día)		
				Media	Mediana	Percentil 95	Media	Mediana	Percentil 95
		Febrero 2015, estación seca	72.5% AFT	0.51 ± 0.08	0.36	1.50	0.9 ± 0.14	0.6	2.6
Honduras, 2021 [13]	Granos de maíz	Septiembre a noviembre 2019	81.25% AFT	6.23	NR	NR	50.9	NR	101.8
	Masa de maíz nixtamalizado	Septiembre a noviembre 2019	75.01% AFT	1.89	NR	NR	15.4	NR	30.9
	Tortillas	Septiembre a noviembre 2019	35.01% AFT	1.06	NR	NR	8.7	NR	17.3
Presente estudio	Masa de maíz nixtamalizado	Estación lluviosa 2023, las 4 localidades	19.9% AFT	3.64 ± 0.54	NR	10.25	12.44	NR	35.07
		Estación seca 2023-2024, las 4 localidades	23.9% AFT	1.93 ± 0.20	NR	4.68	6.60	NR	16.00

NR: Not reported

Tabla 8. Prevalencia, contenidos e ingesta diaria estimada de las aflatoxinas en derivados de maíz en países de Mesoamérica

País y año del estudio citado	Derivados del maíz	Período de muestreo	Fumonisinias						
			Prevalencia	Contenido (mg/kg)			Ingesta diaria estimada (µg/kg*pc/día)		
				Media	Mediana	Percentil 95	Media	Mediana	Percentil 95
México, 2011 [20]	Harina instantánea para masa de maíz	NR	53%	0.94 ± 0.16	1.02	1.76	4.86	5.28	9.12
México, 2019 [2]	Tortillas	Octubre 2013, final estación lluviosa	92.5%	0.06 ± 0.01	0.0458	0.184	0.112	0.056	0.402
		Octubre 2014, final estación lluviosa	87.5%	0.14 ± 0.02	0.0947	0.409	0.236	0.119	0.929
		Febrero 2015, estación seca	97.5%	0.10 ± 0.01	0.068	0.283	0.169	0.085	0.593
México, 2020 [17]	Masa y harina de maíz	Abril 2017, mayo 2019, estación seca	98%	0.71 ± 0.04	0.66	1.38	2.02 ± 0.19	1.64	4.88
Honduras, 2021 [13]	Granos de maíz	Septiembre a noviembre 2019	80%	7.16	NR	NR	58.47	NR	116.95

País y año del estudio citado	Derivados del maíz	Período de muestreo	Fumonisinias						
			Prevalencia	Contenido (mg/kg)			Ingesta diaria estimada (µg/kg*pc/día)		
				Media	Mediana	Percentil 95	Media	Mediana	Percentil 95
	Masa de maíz nixtamalizado	Septiembre a noviembre 2019	60%	4.11	NR	NR	33.57	NR	67.13
	Tortillas	Septiembre a noviembre 2019	36%	2.66	NR	NR	21.72	NR	43.45
Presente estudio	Masa de maíz nixtamalizado	Dry season 2023-2024, all locations	6.7%	2.92 ± 0.35	NR	10.25	9.99	NR	16.31
		Rainy season 2024, all locations	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR

NR: No reportado

Referencias

1. The European Commission, Commission regulation (EU) 2023/915 of 25 April 2023 on maximum levels for certain contaminants in food and repealing Regulation (EC) No. 1881/2006. OJ L 119 (2023) 103-157. Available at <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023R0915&qid=1737050498235>, Accessed 29 Nov 2024.
2. H.A. Wall-Martinez, A. Ramirez-Martinez, N. Wesolek, C. Brabet, N. Durand, G.C. Rodriguez-Jimenes, M.A. Garcia-Alvarado, M.A. Salgado-Cervantes, V.J. Robles-Olvera, A.C. Roudot, Risk assessment of exposure to mycotoxins (aflatoxins and fumonisins) through corn tortilla intake in Veracruz (Mexico), Food Addit. Contam. Part A Chem. Anal. Control Expo. Risk Assess. 36 (2019) 929-939. <https://doi.org/10.1080/19440049.2019.1588997>
3. S. Schaarschmidt, C. Faulh-Hassek, Mycotoxins during the processes of nixtamalization and tortilla production, Toxins 11 (2019) 227. <https://doi.org/10.3390/toxins11040227>
4. IARC (International Agency for Research on Cancer), Mycotoxins and human health, in: J.I. Pitt, C.P. Wild, R.A. Baan, W.C.A. Gelderblom, J.D. Miller, R.T. Riley, F. Wu (Eds.), Improving public health through mycotoxin control. IARC Scientific Publication No.158, 2012, pp. 87-104. Available at <https://publications.iarc.fr/Book-And-Report-Series/Iarc-Scientific-Publications/Improving-Public-Health-Through-Mycotoxin-Control-2012> Accessed 29 Jan 2024.
5. IARC (International Agency for Research on Cancer), Some mycotoxins, in: IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risk to Humans (Ed.), Some traditional herbal medicines, some mycotoxins, naphthalene and styrene. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risk to Humans Vol. 82, 2002, pp. 169-366. Available at <https://publications.iarc.fr/Book-And-Report-Series/Iarc-Monographs-On-The-Identification-Of-Carcinogenic-Hazards-To-Humans/Some-Traditional-Herbal-Medicines-Some-Mycotoxins-Naphthalene-And-Styrene-2002> Accessed 29 Jan 2024.

6. IARC (International Agency for Research on Cancer), Mycotoxins, in: IARC Working Group on the Evaluation of Carcinogenic Risk to Humans (Ed.), Some naturally occurring substances: Food items and constituents, heterocyclic aromatic amines and mycotoxins. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risk to Humans Vol. 56, 1993, pp. 243-524. Available at <https://publications.iarc.fr/Book-And-Report-Series/Iarc-Monographs-On-The-Identification-Of-Carcinogenic-Hazards-To-Humans/Some-Naturally-Occurring-Substances-Food-Items-And-Constituents-Heterocyclic-Aromatic-Amines-And-Mycotoxins-1993> Accessed 29 Jan 2024.
7. EFSA CONTAM Panel (EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain), Risk assessment of aflatoxins in food, EFSA J. 18 (2020) 6040. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2020.6040>
8. EFSA CONTAM Panel (EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain), Appropriateness to set a group health-based guidance value for fumonisins and their modified forms, EFSA J. 16 (2018) 5172. <https://doi.org/10.2093/j.efsa.2018.5172>
9. L. Sabillon, J. Alvarado, A. Leiva, R. Mendoza, R. Espinal, J.F. Leslie, A. Bianchini, Presence, co-occurrence, and daily intake estimates of aflatoxins and fumonisins in maize consumed in food-insecure regions of western Honduras, Toxins 15 (2023) 559. <https://doi.org/10.3390/toxins15090559>
10. J.R. Hernández-Rauda, R.I. Martínez-López, A.T. Cruz-Salmerón, Aflatoxinas y ocratoxinas totales en maíz destinado al autoconsumo en El Salvador: prevalencia e incidencia de casos de contaminación en 2015 y factores ambientales asociados, Universidad Doctor Andrés Bello, San Salvador, El Salvador, 2016. Available at https://www.researchgate.net/publication/298215587_Aflatoxinas_y_Ocratoxinas_totales_en_maiz_destinado_al_autoconsumo_en_El_Salvador_prevalencia_e_incidencia_de_casos_de_contaminacion_2015_y_factores_ambientales_asociados, Accessed 24 Oct 2024.
11. F. Granados-Chinchilla, A. Molina, G. Chavarria, M. Alfaro-Cascante, D. Bogantes-Ledezma, A. Murillo-Williams, Aflatoxins occurrence through the food chain in Costa Rica: Applying the One Health approach to mycotoxin surveillance, Food Control 82 (2017) 217-226. <https://dx.doi.org/10.1016/j.foodcont.2017.06.023>

12. O. Torres, J. Matute, J. Gelineau-van Waes, J.R. Maddox, S.G. Gregory, A.E. Ashley-Koch, J.L. Showker, K.A. Voss, R.T. Riley, Human health implications from co-exposure to aflatoxins and fumonisins in maize-based food in Latin America: Guatemala as a case study, *World Mycotoxin J.* 8 (2015) 143-159. <https://doi.org/10.3920/WMJ2014.1736>
13. J. Cabrera-Meraz, L. Maldonado, A. Bianchini, R. Espinal, Incidence of aflatoxins and fumonisins in grain, masa and corn tortillas in four municipalities in the department of Lempira, Honduras, *Heliyon* 7 (2021) e08506. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08506>
14. P. Castillo-Urueta, M. Carvajal, I. Mendez, F. Meza, A. Galvez, Survey of aflatoxins in maize tortillas from Mexico City, *Food Addit. Contam. Part B Surveill.* 4 (2011) 42-51. <http://dx.doi.org/10.1080/19393210.2010.533390>
15. B.A. Zuki-Orozco, L.E. Batres-Esquivel, M.D. Ortiz-Perez, B.I. Juarez-Flores, F. Diaz-Barriga, Aflatoxins contamination in maize products from rural communities in San Luis Potosi, Mexico, *Ann. Glob. Health* 84 (2018) 300-305. <https://doi.org/10.29024/aogh.918>
16. I. Gilbert-Sandoval, S. Wesseling, I. M.C.M. Rietjens, Aflatoxin B1 in nixtamalized maize in Mexico; occurrence and accompanying risk assessment, *Toxicol. Rep.* 6 (2019) 1135-1142. <https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2019.10.008>
17. I. Gilbert-Sandoval, S. Wesseling, I.M.C.M. Rietjens, Occurrence and probabilistic risk assessment of fumonisin B1, fumonisin B2 and deoxynivalenol in nixtamalized maize in Mexico City, *Toxins* 12 (2020) 644. <https://doi.org/10.3390/toxins12100644>
18. M. Hoteit, Z. Abbass, R. Daou, N. Tzenios, L. Chmeis, J. Haddad, M. Chahine, E. Al Manasfi, A. Chahine, O.B.J. Poh, et al., Dietary exposure and risk assessment of Multi-mycotoxins (AFB1, AFM1, OTA, OTB, DON, T-2 and HT-2) in the Lebanese food basket consumed by adults: Findings from the Updated Lebanese National Consumption Survey through a total diet study approach, *Toxins* 16 (2024) 158. <https://doi.org/10.3390/toxins16030158>

19. I. Huybrechts, I. Jacobs, C. Biessy, E.K. Aglago, M. Jenab, L. Claeys, J. Zavadil, C. Casagrande, G. Nicolas, G. Scelo, et al., Associations between dietary mycotoxins exposures and risk of hepatocellular carcinoma in a European cohort, PLoS One 19 (2024) e0315561. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0315561>
20. A. De Girolamo, M. Pascale, A. Visconti, Comparison of methods and optimization of the analysis of fumonisins B1 and B2 in masa flour, an alkaline cooked corn product, Food Addit. Contam. Part A Chem. Anal. Control Expo. Risk Assess. 28 (2011) 667-675. <https://doi.org/10.1080/19440049.2011.555846>
21. M.T. Menchú, H. Méndez, Análisis de la situación alimentaria en El Salvador, Instituto de Nutrición de Centroamérica y Panamá, Guatemala, 2011. Available at https://www.sdgifund.org/sites/default/files/ISAN_ESTUDIO_El%20Salvador_Analisis%20Situacion%20Alimentaria-INCAP.pdf Accessed 28 Jan 2025.
22. Neogen Corporation, Veratox® HS Quantitative aflatoxin high sensitive test, Neogen Corporation, Lansing, Michigan, 2008. Available at <https://media.neogen.com/m/664d46032e90d1f6/> Accessed 28 Apr 2023.
23. Neogen Corporation, Veratox® for fumonisin quantitative test, Neogen Corporation, Lansing, Michigan. Available at https://www.neogen.com/490385/globalassets/pim/assets/original/10021/1551f-veratox-for-fumonisin_8830_8831_kitinsert.pdf Accessed 28 Apr 2023
24. I. Taverniers, M. De Loose, E. Van Bockstaele, Trends in quality in analytical laboratory. II. Analytical method validation and quality assurance, Trends Analyt. Chem. 23 (2004) 535–552. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2004.04.001>.
25. IPCS (International Programme on Chemical Safety), Dietary exposure assessment of chemical in food, in: WHO/FAO (Ed.), Principles and methods for the risk assessment of chemicals in food. Environmental health criteria 240, 2009, pp. 6-1–6-95. Available at <https://www.who.int/publications/i/item/9789241572408> Accessed 14 Oct 2024.

26. P. Andrade, Dietary risk assessment for fumonisins: challenges and prospects, *Curr. Opin. Food Sci.* 54 (2023) 101080. <https://doi.org/10.1016/j.cofs.2023.101080>
27. EFSA Scientific Committee, A harmonized approach for risk assessment of substances which are both genotoxic and carcinogenic, *EFSA J.* 282 (2005) 1-31. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2005.282>
28. WorldData.info, Average weight and height by country. Available at <https://www.worlddata.info/average-bodyheight.php#by-country> Accessed 02 Dec 2024.
29. R. Hernandez-Rauda, O. Peña, G. Arbaiza, M. Cuadra, M. Guzman, Aflatoxin and fumonisin contents in nixtamalized corn dough, El Salvador, *Mendeley Data* (2025) v1. <https://doi.org/10.17632/rnjgwjtn9r.1>
30. Codex Alimentarius, General standard for contaminants and toxins in food and feed CXS 193-1995, FAO, Rome, Italy, 2023. Available at https://foodfocus.co.za/wp-content/uploads/2021/10/CXS_193-Contaminants-Toxins-2023.pdf, Accessed 29 Nov 2024
31. J.R. Mendoza, A. Rodas, A. Oliva, L. Sabillon, A. Colmenares, J. Clarke, H.E. Hallen-Adams, C. Campabadal, A. Bianchini, Safety and quality assessment of smallholder farmers' maize in the Western Highlands of Guatemala, *J. Food Prot.* 81 (2018) 776-784. <https://doi.org/10.4315/0362-028X.JFP-17-355>
32. M. Ulloa-Sosa, H.W. Schroeder, Note on aflatoxin decomposition in the process of making tortillas from corn, *Cereal Chem.* 46 (1969) 397-400. Available at <https://www.cerealsgrains.org/publications/cc/backissues/1969/Documents/CC1969a52.html>, Accessed 10 Jan 2025
33. M.C. de Arriola, E. de Porres, S. de Cabrera, M. de Zepeda, C. Rolz, Aflatoxin fate during alkaline cooking of corn for tortilla preparation, *J. Agric. Food Chem.* 36 (1988) 530-533. Available at https://www.academia.edu/6714692/Aflatoxin_fate_during_alkaline_cooking_of_corn_for_tortilla_preparation, Accessed 10 Jan 2025

34. S. Odjo, A.E. Alakonya, A. Rosales-Nolasco, A.L. Molina, C. Muñoz, N. Palacios-Rojas, Occurrence and postharvest strategies to help mitigate aflatoxins and fumonisins in maize and their co-exposure to consumers in Mexico and Central America, *Food Control* 138 (2022) 108968. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2022.108968>
35. I.B. Molina-Pintor, M.A. Ruiz-Alas, M.C. Guerrero-Flores, A.E. Rojas-Garcia, B.S. Barron-Vivanco, I.M. Medina-Diaz, Y.Y. Bernal-Hernandez, L. Ortega-Cervantes, C.H. Rodriguez-Cervantes, A.J. Ramos, et al., Preliminary survey of the occurrence of mycotoxins in cereals and estimated exposure in a northwestern region of Mexico, *Int. J. Environ. Health Res.* 32 (2022) 2271-2285. <https://doi.org/10.1080/09603123.2021.1953447>
36. E.W. Sydenham, S. Stockenstrom, P.G. Thiel, G.S. Shepard, K.R. Koch, W.F.O. Marasas, Potential of alkaline hydrolysis for the removal of fumonisins from contaminated corn, *J. Agric. Food Chem.* 43 (1995) 1198-1201. Available at https://www.researchgate.net/publication/231545342_Potential_of_Alkaline_Hydrolysis_for_the_Removal_of_Fumonisins_from_Contaminated_Corn#fullTextFileContent, Accessed 11 Jan 2025